

INSTITUTO COLOMBIANO DE ANTROPOLOGÍA E HISTORIA (ICANH)

Contrato no 146 de 2011

**INFORME ESTUDIO DE CONSOLIDANTES PARA LA DECOHESIÓN DE LA  
FUENTE DE LAVAPATAS, SAN AGUSTÍN, HUILA**

**Corporación Proyecto Patrimonio**

Helen Jacobsen

Supervisora de contrato: Martha Patricia Ramírez Nieto,  
Restauradora ICANH

Bogotá, Abril de 2012



## INDICE

CONTENIDO	Pág.
1. Presentación	3
2. Descripción de la decohesión	4
3. Toma y preparación de muestras	7
3.1 Toma de muestras	7
3.2 Preparación de los núcleos	9
4. Caracterización de la roca	9
4.1 Estudio geológico de las muestras	9
4.1.1 Procedencia y Formación	9
4.1.2 Descripción macroscópica	10
4.1.3 Conclusiones	10
4.1.4 Conclusiones del estudio geológico	12
4.2 Propiedades de la roca en su estado original	13
5. Estudio de roca artificialmente deteriorada	15
5.1 El deterioro artificial	15
5.2 Evaluación del deterioro artificial	16
5.3 Propiedades de la roca artificialmente deteriorada	19
5.4. Conclusiones del deterioro artificial	19
6. Selección del material consolidante	20
6.1 Estado actual de la investigación en consolidación de piedra	20
6.2 Consolidantes en la conservación de toba volcánica	23
6.3 Los consolidantes escogidos para el estudio	26
7. Condiciones y estudios base para la evaluación de consolidantes	30
7.1 Estudios necesarios para la evaluación de las propiedades de la roca	31
7.2 Condiciones necesarias para la evaluación de la consolidación de piedra	32
7.3 Estudios realizados para evaluar la consolidación de toba	32
8. Las series de consolidantes seleccionados	34
9. Evaluación de propiedades de la roca para determinar la efectividad del consolidante.	37
9.1. Profundidad de consolidación y tiempo de penetración	37
9.2. Porosidad accesible al agua	40
9.3 Permeabilidad al vapor de agua	42
9.4 Coeficiente de absorción de agua	43
9.5 Expansión hídrica	47
9.6 Expansión térmica	49
9.7 Cambio de color	53
9.8 La velocidad del ultrasonido	54
9.9 Resistencia de tensión-flexión y módulo estático de elasticidad	
10. Resumen de los estudios y conclusiones	
11. Bibliografía	
12. Lista de figuras	

## 1. Presentación

Como se demostró en los estudios anteriores sobre la Fuente del Lavapatás, uno de los deterioros que afecta actualmente la conservación de las formas esculpidas es la decohesión. El tratamiento de conservación adecuado para este tipo de deterioro se determina a partir de estudios comparativos, donde se evalúan diferentes materiales de conservación y sus efectos en la roca.

La investigación que aquí se presenta tiene por finalidad determinar el producto consolidante más adecuado para tratar la consolidación de zonas decohesas en la Fuente de Lavapatás. Esta investigación siguió la metodología propuesta por Snethlage, Wendler y Sasse (Snethlage y Wendler, 1995 y Sasse, Snethlage, 1996) que consta de las siguientes etapas:

- Toma, evaluación y preparación de muestras adecuadas para el estudio comparativo, realizando secciones delgadas que fueron analizadas bajo el microscopio petrográfico. La preparación de muestras fue realizada en los laboratorios de Sika, Bogotá.
- Selección de los materiales consolidantes a evaluar a partir de revisión bibliográfica detallada.
- Determinación de las características físicas de la roca antes y después de la consolidación (cambio en la velocidad de ultrasonido, la absorción de agua, porosidad y densidad, expansión hídrica, expansión térmica, la resistencia de tensión flexión y el módulo estático de la elasticidad, y el color).
- Selección del consolidante y el método de consolidación *in situ*.

Durante el estudio se decidió adicionalmente determinar el tamaño de los poros de la roca mediante la porosimetría de mercurio. Los poros y en particular el tamaño de los poros describen por un lado las características de la toba y por otro determinan el resultado de una consolidación. El estudio de poros por secciones delgadas permite reconocer poros con un radio mayor a  $3\mu\text{m}$ . La porosimetría de mercurio permite determinar los poros de una toba con radio menor a  $3\mu\text{m}$  y fue realizada en la Universidad Freiberg, Alemania.

También se añadió el estudio de las isotermas de adsorción, realizado en los laboratorios de la Universidad de Ciencias aplicadas de Potsdam, Alemania, que permiten conocer mejor la adsorción de la roca en diferentes humedades. El estudio se ejecutó siguiendo el método de desecador que hace uso de diferentes soluciones salinas saturadas para estabilizar la humedad relativa.

La presente investigación fue realizada por la restauradora Helen Jacobsen, la interpretación de las secciones delgadas fue hecha por la geóloga Lina Fernanda Martínez y la revisión de los textos por las restauradoras Lina Castillo y María Paula Alvarez.

## 2. Descripción de la decohesión

Como se describió anteriormente este estudio tiene como objetivo determinar un consolidante adecuado para tratar el deterioro conocido como **decohesión**.

La decohesión es la desagregación de mínimas partículas de roca y se manifiesta con la pulverulencia de la superficie rocosa. Dado que la toba volcánica está compuesta por una matriz vítrea, fragmentos de vidrio y en menor proporción cristales de plagioclasa, cuarzo, biotita y fragmentos de roca ígneos y metamórficos, cuando ocurre este deterioro hay desagregación de estos minerales.

A nivel macroscópico las zonas que presentan decohesión pueden aparecer irregulares pero es ante todo con la prueba al tacto con la que se comprueba este deterioro pues en la superficie de una área decohesa (o pulverulenta), partes de tamaño mínimo se desprenden fácilmente.



Figura 1: La foto muestra una zona dentro de la Fuente donde se observa el deterioro llamado decohesión. El área presenta más irregularidades mientras que los bordes aparecen más lisos, al tacto se desprenden partes mínimas de roca.



Figura 2: En la foto se presenta otra zona de la Fuente donde hay decohesión allí las irregularidades no resultan tan evidentes sin embargo la prueba al tacto permite corroborar la pulverulencia.

Mediante la determinación de la absorción de agua (tubo Karsten) en zonas estables y zonas decohesas se constató que esta propiedad es mucho más alta en zonas decohesas que en zonas estables. En partes donde la roca se muestra estable a la prueba del tacto el coeficiente de absorción  $w$  registrado se encontraba entre 0 y  $1,6 \text{ l/m}^2\text{h}^{0,5}$ . En las zonas de la Fuente que presentan decohesión en superficie el coeficiente de absorción de agua fue más alto y correspondió a  $5 \text{ l/m}^2\text{h}^{0,5}$  y más.

Este resultado indica que la estructura de la piedra es diferente comparando zonas estables y pulverulentas. Mientras que en las zonas estables si bien los poros no están conectados entre sí, la piedra tiene una cierta porosidad dada por las microfisuras existentes a nivel microscópico. La alta absorción de agua en zonas pulverulentas apunta a que ahí existe una red de fisuras mayor en la estructura pétreo y que los poros existentes están más interconectados.

A nivel microscópico se observa en las secciones delgadas de zonas estables que se encuentran muy pocas fisuras mientras que en las secciones tomadas de zonas más deterioradas se encuentran más fisuras ramificadas. Estas fisuras tienen dimensiones que oscilan entre 4 y  $70 \mu\text{m}$ . A eso se suma la presencia de unas pocas fisuras con dimensiones cercanas de  $200 \mu\text{m}$ , y otras que ya se observan a nivel macroscópico de dimensiones mayores a  $200 \mu\text{m}$ .

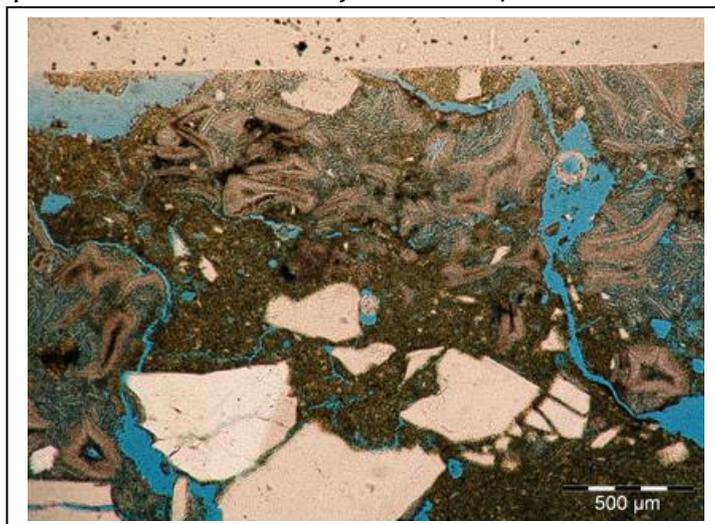


Figura 3: Microfotografía de la sección delgada 2 que presentaba decohesión. En color azul se observan varias fisuras y poros de diferentes tamaños.

La profundidad de la decohesión no se pudo determinar pues resultó imposible tomar una muestra que permitiera estudiar el desarrollo de este deterioro hacia el interior de la roca. Se supone entonces que la decohesión ocurre a poca profundidad y que tanto la cantidad de fisuras y poros como su apertura, disminuye hacia el interior de la roca.

Como se pudo demostrar el fenómeno de la decohesión está asociado a la formación de fisuras. Las fisuras permiten que el agua (en forma líquida) entre al material rocoso y que se deteriore la matriz vítrea, provocando la pérdida de soporte de los cristales y por lo tanto la disgregación de la superficie de la roca.

Adicionalmente los cambios en el ambiente (temperatura y agua) provocan la expansión y contracción del material pétreo, fuerzas que generan rupturas. Pero como este proceso se desarrolla lentamente y requiere de muchos ciclos lo más probable es que las zonas decohesas que observamos hoy en día ya se empezaron a formar mucho tiempo atrás. Es probable que actualmente, con las condiciones de equilibrio que ha alcanzado la roca en la Fuente, gracias al cobertizo y a la entrada mas o menos regular de agua, éste deterioro no esté avanzando. Sin embargo es importante decir que cuando el agua de la quebrada se rebosa o se pisa la superficie pétreo, ocurren condiciones fuera del equilibrio que favorecen el avance de éste deterioro.

Las zonas que muestran decohesión en la Fuente están irregularmente distribuidas como se puede ver en el siguiente gráfico.

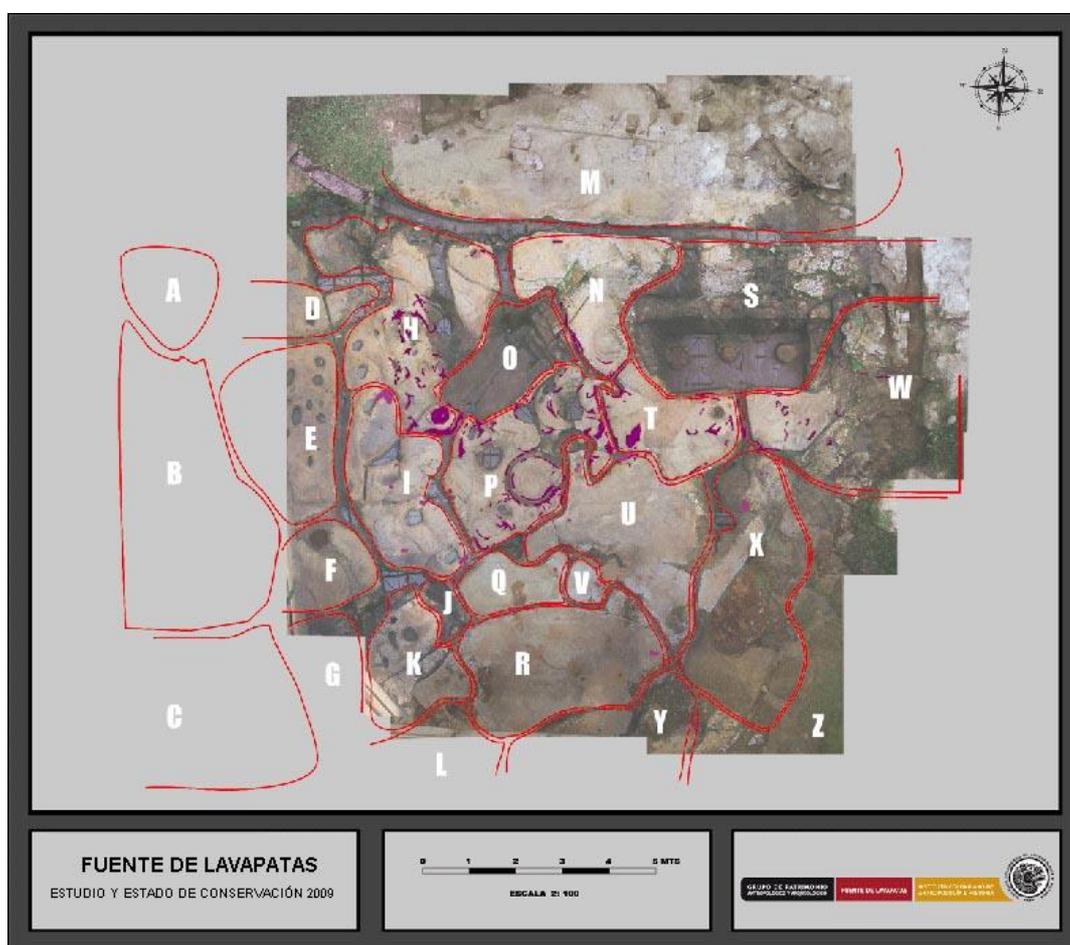


Figura 4: El levantamiento de las zonas decohesas en la Fuente (situación en el 2009).

En varias zonas, la decohesión aparece asociada a la presencia de fisuras de dimensiones superiores a  $200 \mu\text{m}$ . En la medida en que el consolidante que se está estudiando en esta investigación, silicato de etilo, no tiene capacidad para consolidar fisuras superiores a los  $100 \mu\text{m}$ , para tratar las zonas mencionadas anteriormente se debería llevar a cabo otra investigación. Por el tamaño de la fisura el producto a utilizar sería un mortero y no un consolidante líquido.

Hay que destacar que el estudio actual para la determinación del consolidante no puede aplicarse en la denominada zona blanda de la Fuente ( sectores S/W). Esto se debe a que el deterioro que se puede apreciar, previo estudio de las láminas delgadas, es muy distinto al que se ha estudiado actualmente debido a la alta humedad de la zona. Debido a ello se debería llevar a cabo un estudio diferente para poder determinar un tipo de consolidante que se pueda aplicar con un alto índice de humedad.



Figura 5: Zona con decohesión dónde se observan fisuras con dimensiones entre 200  $\mu\text{m}$  y hasta más de 1 mm y partículas más grandes disgregadas.

### 3. Toma y preparación de muestras

#### 3.1 Toma de muestras

La investigación realizada en 2009 sobre las características físicas y geológicas puso en evidencia la imprescindible necesidad de trabajar con material rocoso procedente de la Fuente. Para ese momento se habían utilizado piedras de zonas aledañas que presentaban características macroscópicas similares a la roca de la Fuente. Sin embargo, tanto a nivel microscópico como en lo referente a las características físicas se constató que resultaban muy diferentes. De hecho las rocas no se parecían microscópicamente ni a la Fuente ni entre ellas y los resultados de las características físicas se enmarcaron en un rango muy amplio de valores que inclusive resultaron contradictorios.

En el 2011 se decidió entonces tomar una muestra del lecho de la Fuente para realizar la investigación. Se escogió una roca que cumplió con los siguientes criterios: 1. Que no estuviera en la zona central de la Fuente, ni presentara tallas.

2. Que presentara características macroscópicas similares (color, textura) a la de las piedras talladas o con formas.

Dado que éste estudio requería de una muestra rocosa de dimensiones importantes y que la decohesión es un deterioro que se encuentra sobre zonas pequeñas distribuidas de manera dispersa en la Fuente, no fue posible extraer muestras que presentaran éste deterioro. La muestra tomada se encontró en la zona abajo del puente donde limita la Fuente y continúa el lecho de la quebrada y fue denominada muestra A.<sup>1</sup>



Figura 6 (izq.): Vista general de la zona de donde fue tomada de la muestra A para el estudio del consolidante.

Figura 7 (der.): Detalle de la zona donde fue tomada la muestra A para el estudio del consolidante.

Para completar el material rocoso necesario para el estudio se escogió adicionalmente una roca que se encontraba suelta en el lecho de la Fuente y que presentó características macroscópicas similares a ésta. Esta muestra fue denominada muestra B.



Figura 8: La muestra B se encontraba suelta en el lecho de la Fuente.

<sup>1</sup> Para mayor información sobre tamaño y orientación de las muestras consultar documento anexo.

### 3.2 Preparación de los núcleos

Una vez se tomaron las muestras era indispensable preparar los núcleos sobre los cuales se llevaron a cabo las pruebas. En el laboratorio Sika, Bogotá, empleando la barrena sacamuestras – Hilti, las rocas A y B fueron utilizadas para extraer los núcleos. Estos tuvieron un diámetro de 4,9 cm. La longitud de cada núcleo era diferente y varió entre 1 cm y 10 cm pues debido a la baja dureza y las fracturas presentes en las muestras, varios de los núcleos se rompieron fácilmente. De la roca A se extrajeron 10 núcleos y de la roca B 5 núcleos.



Figura 9: Núcleos que se extrajeron de la muestra A. La mayoría de estos núcleos se seccionaron debido a las discontinuidades características de la roca.

## 4. CARACTERIZACIÓN DE LA ROCA

### 4.1 Estudio geológico de las muestras<sup>2</sup>

#### 4.1.1 Procedencia y formación

La Fuente Lavapatás se encuentra labrada en depósitos ignimbríticos. De acuerdo a la mineralogía (cuarzo-plagioclasa-feldespato potásico) hallada en las rocas de la Fuente, éstas tienen composición andesítica-dacítica hasta riolítica.

Estas ignimbritas, y aquellas encontradas en el Cauca, se les puede asignar una edad Plioceno-Pleistoceno y parecen asociarse a la continua actividad volcánica ocurrente en la antigua Caldera de Paletará, localizada en el sector comprendido por el valle de Paletará y la Laguna de San Rafael, municipio del Cauca.

---

<sup>2</sup> Para mayor información sobre la roca consultar: Alvarez, et al: 2012.

#### 4.1.2 Descripción macroscópica

Macroscópicamente las ignimbritas de la Fuente de Lavapatas presentan tonos gris claro a ocre, y un tamaño de grano que va de fino a muy fino. Constan de una matriz vítrea con diferentes grados de alteración desde alto a bajo y fragmentos de cristales, vidrio y pómez, dentro de la matriz dispuestos de forma caótica y orientados de acuerdo a la dirección del flujo de pómez.

En las dos muestras se observaban muchas discontinuidades y fisuras paralelas a la superficie.

Como se mencionó la muestra A y la muestra B se encontraban en la parte de abajo de puente La muestra A, en la medida en que hacía parte del lecho, se encontraba bajo el agua durante las horas del funcionamiento del sistema de circulación de agua. La roca B se encontró suelta en el lecho, y estaba húmeda por el contacto con el caudal.

Tanto la muestra A como la muestra B presentan dureza intermedia entre 2.5 y 5.5 en la escala de Mohs.



Figura 10. Detalle de la muestra A donde se observan discontinuidades dentro de la roca.

#### 4.1.3 Descripción microscópica

De la muestra A se prepararon 3 secciones delgadas de diferentes partes (una correspondiente a la superficie y dos del interior de la roca) y de la muestra B se preparó una sección para el estudio de los análisis petrográficos. A continuación se presentan los resultados.

##### **MUESTRAS DE LA ROCA A**

En las muestras de la roca A se observa una matriz vítrea con abundantes fragmentos vítreos (shards), rodeando algunos cristales y fragmentos de cristales de feldespato y anfíbol. Mientras que en la sección A1 se trata de una composición

ácida a intermedia por su contenido de feldespato, en la muestra A2 la presencia de piroxeno indica que su composición es más bien básica.

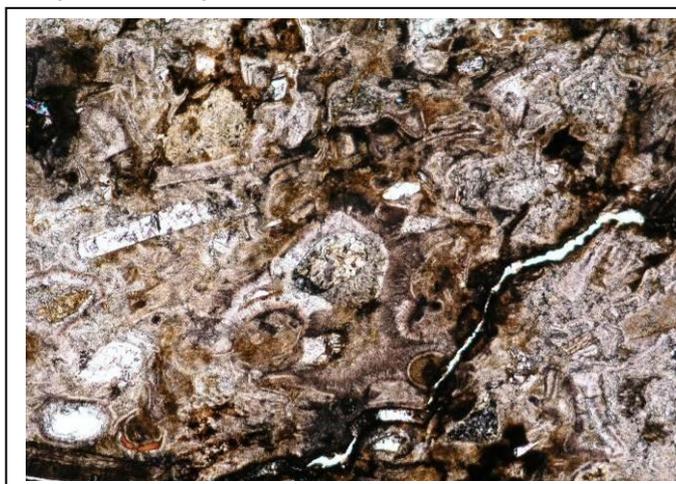


Figura 11: Microfotografía de la sección A1.

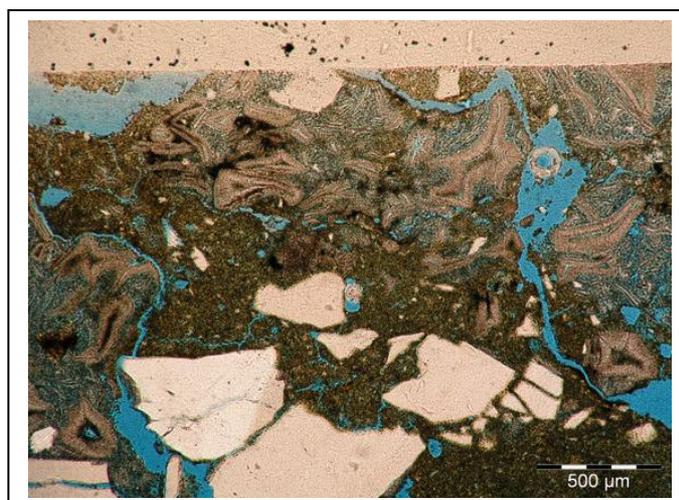
En la sección A1 la mayoría de los componentes se encuentran preferencialmente orientados mientras que en la sección A2 los componentes muestran un arreglo más caótico. En las secciones A 1 y A2 se observan algunos poros y fisuras en la matriz. No obstante en la sección 3, se observan varios poros y fisuras. Estas fisuras tienen diámetros de 10  $\mu\text{m}$  y hasta un máximo de 60  $\mu\text{m}$ .

En las secciones delgadas las rocas aparecen con alteración moderada a alta, en algunas de ellas se puede distinguir el vidrio transformándose en minerales arcillosos (halloisita, alofana) y otros tipos de filosilicatos (caolinita).

Hacia el centro de la sección A1 se identifican unas fibras color café que pueden interpretarse como “esferulitas”, producto de devitrificación<sup>3</sup>. Atravesando la sección delgada se observa una microfractura con abundante óxido de hierro, aparentemente producido por la desintegración de minerales ferromagnesianos. Este óxido también se encuentra localmente en otras zonas de la sección delgada.

En las secciones puntualmente se identifica palagonita, un tipo de vidrio volcánico de color marrón claro a amarillo y algunos filosilicatos (arcillas) de color marrón oscuro a claro. Es posible que las porciones más claras de la sección, correspondan a fragmentos de pómez ligeramente vesicular, moderadamente alterados.

Figura 12: Microfotografía de la sección delgada A3.



<sup>3</sup> Devitrificación: Crecimiento de cristales fibrosos de cuarzo (cristobalita) o feldespato potásico que adoptan diversos arreglos.

## MUESTRA B

En la muestra B se observan pequeños fragmentos de cristales de feldespato y pómez, embebidos por una matriz vítrea con abundantes shards, sin ninguna orientación preferencial. Se pueden apreciar algunos poros en la matriz y arreglos esferulíticos.

Esta sección exhibe una alteración moderada a alta de forma local, a causa del desarrollo de filosilicatos en la matriz y algunos fragmentos de vidrio. El óxido de hierro ha reemplazado por completo los minerales ferromagnesianos existentes. Ocasionalmente han quedado como evidencia de este proceso formas hexagonales y prismáticas.



Figura 13 : Microfotografía de la sección delgada B1.

### 4.1.4 Conclusiones del estudio geológico

El estudio de las secciones delgadas de las muestras A y B permitió constatar que tanto la roca A como la roca B presentaban las mismas características geológicas que se habían estudiado en las demás secciones de la Fuente y por lo tanto eran aptas para realizar sobre ellas las pruebas con consolidantes.

Vale la pena destacar las disparidades encontradas en las tres secciones de la muestra A, procedente de una roca de dimensiones relativamente pequeñas (50 cm x 30cm x 20cm). Las grandes diferencias en cuanto a composición y porosidad encontradas, manifiestan la amplia heterogeneidad de la piedra.

A partir de los resultados del estudio de secciones delgadas, se dedujo que la piedra A forma parte de la llamada zona de dureza intermedia. Esta zona en cuestión, evidencia una cierta alteración de la masa vítrea en arcillas. Sin embargo, la presencia de poros y fisuras, en particular en la sección A3, complica la clasificación establecida hasta el momento, ya que en la zona de dureza intermedia de la Fuente se observaron fisuras y poros solamente en áreas con

deterioro (decohesión). En los otros puntos de esta zona la porosidad es muy baja.

#### 4.2 Propiedades de la roca en su estado original

En la tabla 1 se presentan las principales propiedades de la roca.<sup>4</sup>

**Tabla 1:** Principales propiedades relacionadas con la porosidad de varias probetas de la muestra A (Las desviaciones estándar se muestran entre paréntesis. Cuando no hay desviación estándar, esto indica que la medición se llevó a cabo utilizando sólo una muestra. Se presenta también el margen total de los resultados en las propiedades en las que se obtuvo un amplio rango de valores)

Propiedades	Margen total	Promedio y (desviaciones estándar)
Porosidad accesible al agua [%]	28,4 – 33,05	30,5 (±2,07)
Densidad real [kg/m <sup>3</sup> ]	2461 – 2481	2471,9 (±13,5)
Densidad aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1661 – 1781	1717,9 (±53,0)
Porosidad total (PIM) [%]		32,13
Porcentaje de volumen total de poros – PIM (%)		
Diámetro de poro > 5µm		6,47
Diám. de poro 0,1µm - 5µm		68,91
Diámetro de poro < 0,1 µm		24,61
Los Máximos:		
Diám. de poro 0,1µm – 0,2µm		11,47
Diám. de poro 0,2µm - 0,5µm		32,42
Diám. de poro 0,5µm - 1 µm		12,92
Coefficiente de absorción de agua w [kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> ]	5,06 – 12,24	8,72 (±2,75)
Factor de resistencia al vapor de agua µ [adimensional]	11,4 – 14,6	13,4 (±1,8)
Expansión hídrica 1-ε [mm/m]	0,816 – 1,567	1,05 (±0,35)
Resistencia de tensión flexión [N/mm <sup>2</sup> ]	1,25 – 3,35	2,16 (±0,88)
Módulo estático de la elasticidad [kN/mm <sup>2</sup> ]	0,22 – 0,82	0,47 (±0,23)
Expansión térmica α [10 <sup>-6</sup> / K]	<u>Orientación x</u> <u>Orientación y</u>	
a 30°C	0 – 1,0            4,06	
a 40°C	3,2 – 7,3           4,36	
a 50°C	5,56 – 6,67        5,75	
a 60°C	5,34 – 7,99        5,82	
Expansión térmica [mm/m]	<u>Orientación x</u> <u>Orientación y</u>	
de 20°C a 30°C	0 – 0,057           0,047	
de 20°C a 40°C	0,063 – 0,144     0,094	
de 20°C a 50°C	0,143 – 0,188     0,182	
de 20°C a 60°C	0,191 – 0,285     0,242	
Velocidad ultrasónica V <sub>L</sub> [km/s]	0,8– 1,06	1,0 (±0,1)

<sup>4</sup> Para resultados y detalles de los estudios ver Anexo del informe Estudio de consolidantes para la decohesión de la Fuente de Lavapatatas, San Agustín Huila.

Como se había definido en el 2009 en la Fuente de Lavapatas se encontraron básicamente tres zonas que se caracterizan por sus propiedades y comportamientos diferentes.

A partir del estudio geológico y el estudio de la dureza, se clasificaron las muestras A y B como pertenecientes a la zona de dureza intermedia, sin embargo, los resultados relacionados con las características de transporte de humedad (porosidad, coeficiente de agua) arrojaron que estas muestras tienen las mismas características de la zona blanda.

En efecto, los núcleos de estas muestras presentaron una alta absorción de agua que no coincide con la baja absorción de agua de la zona intermedia pero que sí coincide con la absorción de la zona blanda. La alta absorción de agua hace posible la expansión hídrica, igualmente alta, que se espera en la zona blanda pero que no es propia de la zona intermedia.

Lo anterior lleva a considerar que los resultados consignados en la tabla no caracterizan la situación que se da en la totalidad de la superficie de la Fuente sino que corresponden a comportamientos de la piedra localizados como aparece planteado en el documento *Consolidado sobre las investigaciones en la Fuente de Lavapatas 2008- 2012* (Alvarez, et al. 2012).

## 5. Estudio de la roca artificialmente deteriorada

Como fue enunciado antes era necesario contar con muestras que se encontraran en el mismo estado de conservación y que presentaran características similares a las de las zonas decohesas.

Si bien las muestras A y B presentaban un estado de conservación muy parecido al de la superficie de la Fuente, no evidenciaban decohesión por lo cual se decidió deteriorar artificialmente una gran parte de los núcleos de estas dos muestras de tal suerte que presentaran disgregación de partículas y un perfil de deterioro como se presume existe en la Fuente, es decir, un deterioro marcado con muchas fisuras cerca de la superficie del núcleo que van disminuyendo hacia el interior de la roca.

### 5.1 El deterioro artificial

Al hacer la revisión bibliográfica del tema de deterioro artificial se encontraron diferentes investigaciones (Perez & al. 1995; Matteini, Moles 1990, p.149ss. Grimm, Schwarz 1984, p.81ss. Snethlage 1984, p.118ss) y entre ellas una donde se trabaja con deterioro artificial sobre tobas (Menzl 2002).

Existen diversas metodologías para deteriorar artificialmente, son frecuentes la basada en ciclos de deshielo (DIN 52104) o la basada en ciclos de cristalización y disolución de sales (DIN 52111, Ahmad 2011). El uso de ciclos de calentamiento y enfriamiento se ha utilizado en particular sobre rocas susceptibles a la expansión térmica como los mármoles (Ahmad 2011, Jacobsen 2006, Sheremeti-Kabashi 2002, Ruedrich 2002, Simon 2001).

Considerando la experiencia de Menzl (2002), quien mediante ciclos de deshielo y el uso de sales había logrado solamente un cierto deterioro de una toba, para este estudio, en el que se contaba con poco tiempo, se decidió aplicar una serie de ciclos de calentamiento y enfriamiento a las muestras (Jacobsen, 2006).

De hecho inicialmente se realizaron pruebas de deterioro artificial con sulfato de sodio (DIN 52111) en solución saturada, pero después de menos de diez ciclos de cristalización y disolución el núcleo se descompuso completamente, por ello se decidió que este método no sería utilizado. Si bien es una muy buena herramienta, necesita ser estudiada por un período más largo de tiempo para que la roca no se deteriore más allá de lo que se necesita para la presente investigación.

Con el método de ciclos de calentamiento y enfriamiento el procedimiento requiere también de poco tiempo y los resultados son muy efectivos en rocas susceptible a carga térmica. Si bien la toba no es una roca de este tipo, el procedimiento que se describe a continuación resultó efectivo:

Sobre una placa de calefacción de 100°C se calentó por 1 minuto un lado de los núcleos que después se sumergió inmediatamente en agua fría (6 – 9°C).

Las superficies expuestas al calor siempre fueron las mismas de tal manera que se buscaba obtener un gradiente de deterioro en el cual se denominó parte superior, la que determina el perfil de deterioro, la más cercana al calor y al frío y parte inferior la más distante a estos cambios térmicos.

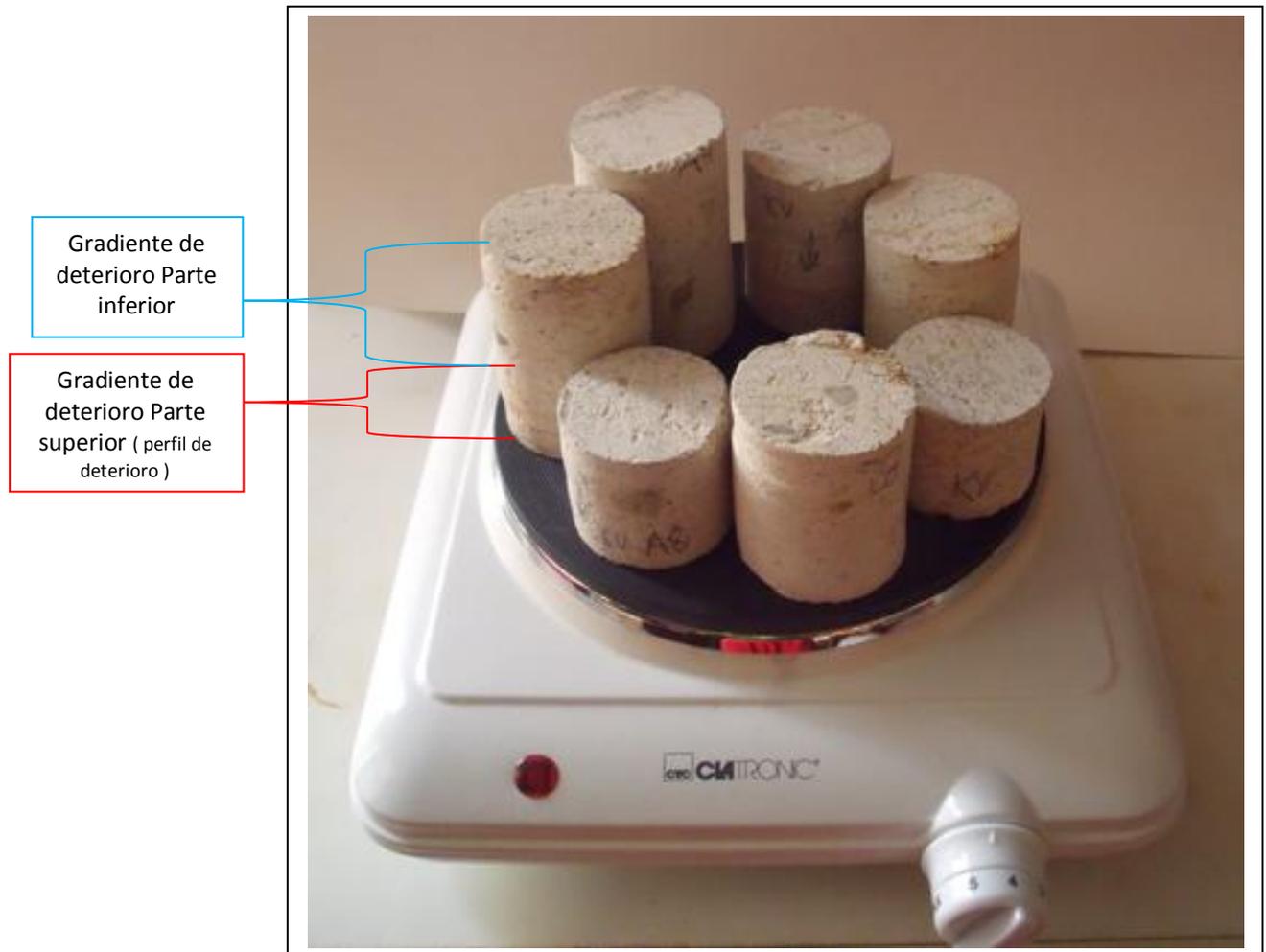


Figura 14: Núcleos calentándose por el lado superior que es el que mostrará mayor deterioro

Después de aproximadamente 30 ciclos se observaron unas primeras fisuras en la superficie tratada. Después de 130 ciclos de calentamiento y enfriamiento se pudo observar que en los núcleos la superficie presentaba desprendimientos de partículas.

## 5.2. Evaluación del deterioro artificial

Con el fin de comprobar si se había logrado el deterioro artificial en los núcleos tratados se realizaron algunas de las pruebas que se llevan a cabo para este propósito. Por el tiempo limitado con el que se contaba, si bien se realizaron estudios que arrojan información respecto al tema, no fue posible documentar en detalle los cambios que sufrió la roca con el proceso de deterioro artificial.

A nivel macroscópico se pudo observar la aparición de pequeñas fisuras después de aproximadamente 30 ciclos y en muchos núcleos se logró que a los 130 ciclos la superficie mostrara decohesión. Es decir, partes de la masa vítrea, cristales o fragmentos se desprendían. De cualquier modo el resultado no fue homogéneo para la totalidad de los núcleos tratados, pues mientras que en unas muestras se logró una superficie en la que, con la prueba al tacto, se desprendieron partículas pequeñas como sucede en la Fuente, en otros núcleos se generaron numerosas fisuras pero al realizar la prueba al tacto la superficie no resultaba pulverulenta.



Figura 15: la muestra A3 antes y después de deterioro. Ya macroscópicamente se observa el deterioro de la muestra en donde además de partículas pequeñas disgregadas también se obtuvo una fisura más grande.

A nivel microscópico se pudo comprobar la aparición de un perfil de deterioro con mayor presencia de fisuras cerca de la superficie tratada que disminuían hacia la parte inferior de los núcleos. Las fisuras tenían en su mayoría diámetros entre  $10\mu\text{m}$  y  $60\mu\text{m}$ . Se encontraron pocas fisuras con diámetros mayores a  $250\mu\text{m}$ .

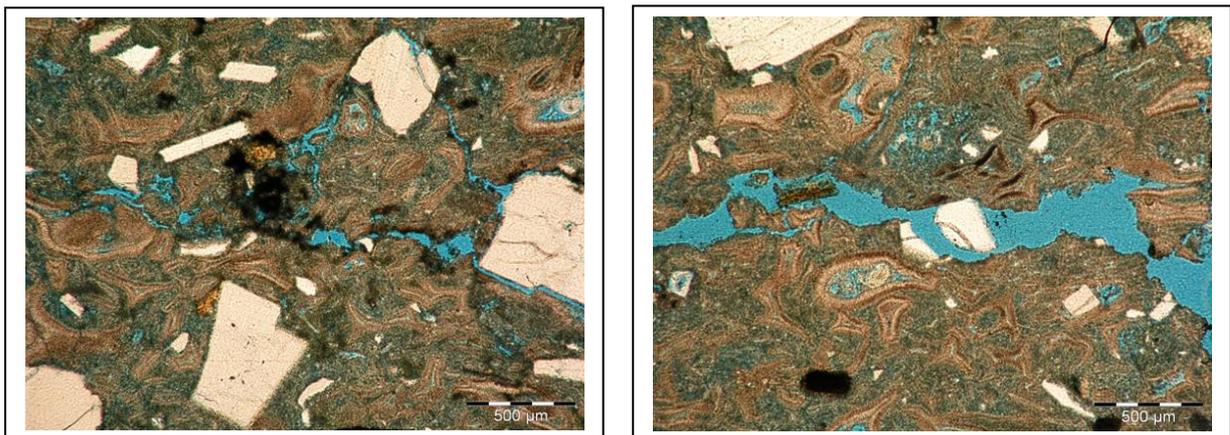


Figura 16: Microfotografía de la sección delgada de la roca A1, artificialmente deteriorada. Mientras que se observan fisuras más pequeñas en la foto de la derecha, a la izquierda se observa una fisura grande que se abre con un ancho de  $220\mu\text{m}$ .

Además de la evaluación macroscópica y microscópica se realizó el estudio de la velocidad ultrasónica y el coeficiente de absorción de agua para comprobar el efecto del deterioro artificial.

Debido al tiempo limitado del estudio no fue posible llevar a cabo el estudio de la velocidad ultrasónica antes y después del deterioro artificial sobre los mismos núcleos. En lugar de eso se midieron la mayoría de los núcleos solamente después del deterioro artificial y cinco núcleos en su estado original. Mediante este método no fue posible constatar ninguna diferencia entre núcleos originales y núcleos deteriorados. Los valores encontrados en los núcleos deteriorados se enmarcaban dentro del rango de las muestras en su estado original. Es muy probable debido a que la velocidad ultrasónica de los núcleos en su estado original ya era muy baja, los valores obtenidos con los núcleos deteriorados no resultaron apreciables.

Tampoco fue posible el estudio de medición del coeficiente de absorción de agua en todos los núcleos, antes y después de su deterioro, pero se escogieron varios núcleos que se estudiaban antes, durante y después del deterioro artificial. Con estos resultados sí fue posible medir las diferencias entre núcleos en su estado original y los tratados con consolidante. En la tabla 2 se presentan los resultados del cambio del coeficiente de absorción de agua durante el deterioro artificial.

Tabla 2: Aumento del coeficiente de absorción de agua durante el deterioro artificial

Muestra	Coeficiente de absorción de agua $[[\text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}]$ antes del deterioro artificial	Coeficiente de absorción de agua $[[\text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}]$ tras 30 ciclos de deterioro artificial	Coeficiente de absorción de agua $[[\text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}]$ tras 120 ciclos de deterioro artificial
A2	11,6		15,78
A3	3,96	4,85	6,49
A4	9,28		10,45
A6	4,95		6,19

En las muestras estudiadas el coeficiente de absorción de agua aumentó entre un 10% y un 60%. Este resultado indica la formación de fisuras que permiten que el agua entre en la estructura rocosa.

Mientras que la observación macroscópica y microscópica de los núcleos después del deterioro artificial y el aumento del coeficiente de agua comprobaron la efectividad del tratamiento de deterioro artificial, no fue posible documentar claramente un cambio de propiedades como la resistencia tensión-flexión, resistencia al vapor de agua o la porosidad accesible.<sup>5</sup> En cuanto a estas propiedades los valores de la roca deteriorada se encontraron dentro del rango de los valores de la roca original.

<sup>5</sup> Ver resultados en el anexo.

### 5.3 Propiedades de la roca artificialmente deteriorada

En la tabla 3 se presentan las principales propiedades físicas de la roca artificialmente deteriorada.<sup>6</sup>

**Tabla 3: Propiedades físicas de varias probetas artificialmente deterioradas de la muestra A**

Las desviaciones estándar se muestran entre paréntesis. Cuando no hay desviación estándar, esto indica que la medición se llevó a cabo utilizando sólo una muestra. Se presenta también el margen total de los resultados, en las propiedades en las que se obtuvo un amplio rango de valores. Los resultados de las propiedades marcadas con (\*) se enmarcan dentro de los rangos de las muestras en su estado original.

Propiedades	Margen total	Promedio y (desviaciones estándar)
Porosidad accesible al agua [%] *	28,4 – 33,05	Perfil no reconocible 30,5 (±2,07)
Densidad real [kg/m <sup>3</sup> ] *	2461 – 2481	Perfil no reconocible 2471,9 (±13,5)
Densidad aparente [kg/m <sup>3</sup> ] *	1661 – 1781	Perfil no reconocible 1717,9 (±53,0)
Coefficiente de absorción de agua w [kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> ]	6,19 – 15,87	9,32 (±3,6)
Factor de resistencia al vapor de agua μ [adimensional] *	11,4 – 14,6	Perfil no reconocible 13,4 (±1,8)
Expansión hídrica 1-ε [mm/m]	0,89 – 1,591	1,15 (±0,32)
Resistencia de tensión flexión [N/mm <sup>2</sup> ]	-	Perfil 1,26 (±0,19) → 2,5 (±0,42)
Módulo estático de la elasticidad [kN/mm <sup>2</sup> ]	-	Perfil 0,2 (±0,09) → 0,51 (±0,14)
Expansión térmica α [10 <sup>-6</sup> / K] a 30°C a 40°C a 50°C a 60°C	<u>Orientación x</u> <u>Orientación y</u> 0                      0 0                      0 3,17                    4,94 4,75                    4,93	
Expansión térmica [mm/m] de 20°C a 30°C de 20°C a 40°C de 20°C a 50°C de 20°C a 60°C	<u>Orientación x</u> <u>Orientación y</u> 0                      0 0                      0 0,094                    0,147 0,188                    0,196	
Velocidad ultrasónica V <sub>L</sub> [km/s] *	0,8– 1,06	1,0 (±0,1)

Uno de los objetivos que se buscaban al deteriorar artificialmente era crear núcleos con un perfil de deterioro, por ello el calor y el frío se aplicaban siempre en una misma cara.

Al finalizar el procedimiento, éste objetivo fue alcanzado pues se observó a nivel microscópico que la cantidad de las fisuras y su ancho se iban disminuyendo hacia la parte inferior de los núcleos artificialmente deteriorados.

<sup>6</sup> Ver resultados y detalles de los estudios en el anexo.

El estudio de la resistencia de tensión-flexión y del módulo de elasticidad también comprobó la existencia de un perfil de deterioro en el cual la estructura rocosa es más débil cerca de la superficie deteriorada, pero los resultados no son muy marcados.

Finalmente los resultados de los estudios de varias propiedades físicas (porosidad, densidad, resistencia al vapor de agua, velocidad ultrasónica, expansión hídrica), no aportaron mayor información a éste tema pues no se registraron diferencias entre la roca original y la roca deteriorada y tampoco un perfil.

La expansión térmica se estudió solamente en un núcleo (en la parte superior desde la superficie hasta 0,5cm de profundidad área que corresponde a la parte probablemente más deteriorada). El resultado indicó una disminución de la expansión térmica, lo que es muy probable, pues como con el deterioro se forman más fisuras, la expansión del material se compensa.

#### **5.4. Conclusiones del deterioro artificial**

Mediante el procedimiento de ciclos de calentamiento y enfriamiento fue posible deteriorar los núcleos extraídos de las muestras A y B. Tanto a nivel macroscópico como microscópico se pudo observar el efecto del deterioro artificial. A nivel macroscópico se observaban en muchos de los núcleos pequeñas fisuras y disgregación de partículas que se evidencian con la prueba al tacto, es decir un indicador muy parecido a la decohesión que se encuentra en la superficie de la roca de la Fuente.

Por medio del estudio microscópico se confirmó la formación de fisuras que disminuyen hacia la parte inferior de los núcleos. El ancho de las fisuras entre  $10\mu\text{m}$  y un máximo de  $60\mu\text{m}$  coincide con las fisuras observadas en zonas deterioradas de la Fuente. Se encontraron también algunas fisuras con un ancho de hasta  $220\mu\text{m}$  lo cual es favorable pues en las secciones delgadas que presentan el deterioro original también se encontraron fisuras más abiertas.

Un muy buen indicador del deterioro fue el coeficiente de absorción de agua que subió en las muestras estudiadas entre un 10% y un 60%. El aumento del coeficiente de absorción de agua indica un aumento en la porosidad accesible, es decir, se formaron más fisuras que permitieron una absorción de agua más rápida.

Es necesario mencionar que el efecto del deterioro artificial impactó de manera muy distinta los diferentes núcleos. Mientras que en algunos de ellos después de poco tiempo aparecían las primeras fisuras, había otros donde las fisuras no aparecían sino después de muchos ciclos de deterioro.

Debido a la heterogeneidad que caracteriza la estructura interna de la toba volcánica y al limitado número de muestras tomadas y estudiadas no podemos, en algunos puntos, establecer claras diferencias entre la piedra en su estado original y la piedra degradada artificialmente.

## 6. SELECCIÓN DEL MATERIAL CONSOLIDANTE

### 6.1 Estado actual de la investigación en consolidación de piedra

Con el fin de determinar los productos consolidantes que debían ser utilizados en la investigación sobre el material consolidante para las zonas decohesas, se llevó a cabo una revisión bibliográfica amplia encontrando que en Francia, Italia, Japón, Honduras, Estados Unidos, Chile y Alemania, se han desarrollado investigaciones utilizando consolidantes sobre toba volcánica. Es de notar que Alemania es uno de los países que más ha trabajado en el tema, lo que resulta interesante puesto que la presente investigación tuvo lugar en los laboratorios de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Potsdam, que cuenta con un programa de conservación especializado en Conservación de Piedra.

La revisión y comparación reveló lo siguiente:

La mayoría de los estudios describen a las tobas como unas piedras muy blandas con características que favorecen su deterioro (Paul Getty Trust e Instituto Hondureño de Antropología e Historia, 2006; Eggloffstein, 1998; Voute, 1969). Debido a esta característica, las tobas han sido desde tiempos pasados un material atractivo para tallar en distintas regiones del mundo, de allí que se hayan realizado estudios a nivel mundial para su conservación.

Los estudios señalan que el comportamiento frágil de la toba se debe a sus características físico-mecánicas y químicas. Componentes inestables como el vidrio, la porosidad alta, el espectro variable del tamaño de los poros y la baja dureza, hacen a la toba muy susceptible a los procesos de deterioro.

Es importante resaltar la influencia del agua que en todos los estudios es considerada como elemento devastador. Al respecto, muchas de las investigaciones proponen como única alternativa de conservación desviar o evitar el contacto con el agua y mencionan que no es apropiado exponer esta roca a la intemperie.

Los estudios describen la toba como una piedra poco homogénea. Una misma variedad de toba puede presentar características diversas debidas a la diagénesis y a variaciones en la estructura. Lo anterior coincide con lo encontrado por el estudio de Álvarez y Jacobsen que se llevó a cabo en el 2008 sobre las características físicas y geológicas de la roca de la Fuente del Lavapatás (Álvarez et. Al 2009) y dónde casi todas las propiedades estudiadas presentaban variaciones notables. Lo anterior hace que sea muy difícil llegar a conclusiones y a generalizaciones sobre el estudio de la roca.

Por lo mencionado en la bibliografía, todos los estudios realizados contaron con dificultades y resumen al final que la consolidación de la toba es sumamente difícil

y hasta imposible en varios casos. (Paterno, Charola 2000; Steindlberger, Auras 1999; Siedel, Honsinger y Breitbach 1995.)

Así Michnia y Piaszczyński encuentran que “la consolidación estructural de la variedad de toba alemana “Römertuff” con silicato de etilo [...] resulta potencialmente perjudicial.” (Michnia, Piaszczyński 2006, p.85).

Paterno y Charola concluyen luego de un estudio de toba en Filipinas que “aparte de que el tratamiento estudiado (la consolidación) podría servir para fortalecer el material y retardar el deterioro, también podría ser que tratamientos tradicionales como la aplicación de un revoque fuera una solución eficaz y barata” (Paterno, Charola 2000, p.163).

Otro ejemplo es un estudio de tobas de Hungría y Alemania donde se llega a la conclusión que “los consolidantes aumentaron la dureza de todas las tobas pero bajaron la durabilidad de las mismas.” (Stück, Forgó, Rüdrieh, Siegesmund, Török 2008, p.712)

Además de que aumentar la dureza a un nivel aceptable sin modificar las demás propiedades de la toba resulta ser un reto, los estudios describen que durante las pruebas de consolidación se encuentran dificultades como que el consolidante no llega a la profundidad necesaria o que por la porosidad de la toba, el consolidante no llega a los poros donde debería llegar. (Wendler 2006; Menzl 2002; Siedel, Honsinger, Breitbach 1995)

Lo anterior pone de manifiesto las precauciones que hay que tener en cuenta al realizar estudios de consolidación para la Fuente del Lavapatas y el rigor que requiere dicha investigación.

## **6.2 Consolidantes en la conservación de toba volcánica**

Existen cuatro tipos frecuentes en la consolidación de piedras: el silicato de etilo, las resinas acrílicas, resinas epoxi y resinas poliuretanas. Aparte de estos cuatro tipos químicamente diferentes existen, de cada uno de ellos, muchos productos de diferentes fabricantes y muchas posibilidades de cómo usar los productos.

Entre otros se pueden variar los disolventes y las concentraciones usadas, también hay estudios que intentan mejorar las características al realizar mezclas de consolidantes.

Debido a la cantidad de núcleos que se extrajeron de la fuente para realizar las pruebas, la presente investigación se concentró en la evaluación de un consolidante en donde se varían las mezclas de productos. La selección de dichos productos se realizó teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

Hasta los años 90 se conocían pocos productos consolidantes a base de **resinas poliuretanas** y pocas investigaciones donde se usaban para la consolidación de toba (Menzl 2002; Siedel, Honsinger, Breitbach 1995). Dichas investigaciones arrojaron resultados contradictorios, mientras que Menzl (2002) considera que este producto es aceptable para la consolidación de toba, para Siedel éste presenta problemas con la absorción, la dureza y la penetración de vapor de agua. Lo anterior nos permitió tomar la decisión que en este estudio no se trabajaría con resinas poliuretanas.

Con relación a las **resinas epoxi encontramos** que se han usado ampliamente en la conservación de piedra en general, de hecho en varios países como Polonia hay extensa experiencia con estas (Cavaletti, Lazzarini, Marchesini y Marinelli, 1985; Alessandrini, Peruzzi, Rossi-Doria y Tabasso, 1978; Hatsagortsian, 1988), sin embargo, su uso en la conservación de toba aún es limitado. Como desventajas se menciona con frecuencia un oscurecimiento de las superficies tratadas (Useche, 1994), una baja penetración (Erder, 1995) y una dureza y un módulo estático de la elasticidad no favorables. Aunque hay intentos recientes de usar los epoxis en la conservación de toba, y existen nuevos productos epoxi que parecen no contar con las mencionadas desventajas, por la poca experiencia con la que se cuenta, se decidió no incluir éstas resinas en el estudio de consolidantes para la decohesión de la Fuente de Lavapatas.

Las **resinas acrílicas** son consolidantes frecuentemente usados en la conservación de piedra y han sido ampliamente utilizados para la consolidación de toba. (Forgó, Stück, Maróthy, Siegesmund, Török, Ruedrich 2008, 2006; Menzl, 2002; Siedel, Honsinger y Breitbach, 1995; Useche, 1994, Tabasso, Mecchi y Santamaria 1994). Aparecen referenciadas en las investigaciones a la par que los silicatos de etilo, que son el tipo de consolidante mejor aceptado. Debido a que las pruebas que se requieren para probar su eficacia requieren de condiciones que no son fáciles de reunir en esta investigación, su uso fue descartado.

El **silicato de etilo** es el consolidante más usado en la conservación de piedra y en todos los estudios de toba siempre está incluido. En muchos estudios se evaluó el silicato como mejor opción (entre otros: Bahamondez, Prieto & al. 2007; Wendler, 2006; Friese, Wendler y Bolze 2004; Bahamondez Prieto y Valenzuela 2004; Lazzarini, Lombardi, Marconi y Meucci, 1996; Möllenkamp, 1996; Useche, 1994; Bianchetti, Lombardi, Marini y Meucci, 1990; Lukaszewicz, 1994, Bahamondez Prieto, 1990)

El uso de silicatos ha sido frecuente desde los años setenta y puesto que la conservación de los monumentos sobre los cuales se aplicó ha tenido un buen resultado (Bahamondez Prieto y Valenzuela, 2004; Michnia y Piaszczynski, 2006), es posible hoy asegurar que se trata de un producto confiable y efectivo. Es así como Lazzarini, Lombardi, Marconi y Meucci en 1996 constatan a partir de un estudio visual que la consolidación de unos moais en la isla de Pascua con silicato de etilo Wacker OH resulta funcional tras 15 años de su aplicación.

A pesar de que el **silicato de etilo** es considerado como el consolidante más adecuado para la conservación de piedra, las diferentes investigaciones mencionan algunos inconvenientes que éste presenta. Varios estudios describen su dificultad en la penetración. Si bien es uno de los consolidantes que penetra con mayor facilidad, la profundidad que alcanza no siempre es la deseada (Menzl 2002). También se menciona que la dureza de la piedra a tratar aumenta más de lo esperado tras la consolidación con silicato (Forgó, Stueck, Maróthy, Siegesmund, Toeroek y Ruedrich 2006; Auras y Steindlberger, 2005). Para facilitar la penetración del consolidante y para evitar una dureza demasiado alta, en varios estudios se usa un silicato de etilo diluido (Bahamondez Prieto & al. 2007; Michnia, Piaszczyński 2006, Wendler 2006, Lukaszewicz 1994). De hecho estos estudios arrojan resultados positivos al respecto, pues mencionan que el silicato presenta una alta velocidad de penetración aunque en casos puntuales la dureza de la roca no aumentó como se esperaba (Michnia, Piaszczyński 2006).

Otro problema frecuentemente mencionado en las investigaciones es el aumento de la dilatación hídrica (Forgó, Stueck, Maróthy, Siegesmund, Toeroek y Ruedrich 2006; Kroszk, 1998; Schenk, 1996; Möllenkamp, 1996). Para contrarrestar este problema se intentó utilizar un producto que buscaba disminuir la dilatación hídrica (Forgó, Stueck, Maróthy, Siegesmund, Toeroek y Ruedrich 2006; Wendler, Charola y Fitzner, 1996, Wendler, 2005.) sin embargo los resultados no siempre fueron los esperados (Doelitzscher 2005).

A pesar de que el silicato no se considera como un consolidante que afecte el color original de la superficie tratada, Menzl en 2002 observó un cambio de color en sus muestras consolidadas. En su aplicación común el silicato produce un oscurecimiento que después de varias semanas desaparece.

Otro inconveniente registrado en las investigaciones (Charola 1987/88), menciona el caso de lixiviación del silicato que formó una capa blanca sobre la piedra.

Del silicato de etilo se consiguen varios productos que se distinguen por el tamaño de las moléculas, la cantidad de sustancia, o tienen fórmulas que contienen por ejemplo un componente elastificador o un componente hidrófobo. Cada uno de esos consolidantes tiene otro efecto en la piedra consolidada.

Recientemente se ha intentado aumentar la eficacia del silicato de etilo aplicando primero un producto para aumentar la conexión entre el consolidante y el entramado interno (Wendler, 2008; Wendler 2006 p.98) Según Wendler (2006) se trata de compuestos químicos muy polares como el ácido tartárico que permiten aumentar la atracción de las superficies para el enlace covalente del gel de silicato con dicho entramado.

### 6.3 Los consolidantes escogidos para el estudio

Debido a los resultados de la revisión bibliográfica y el limitado material rocoso con el que se contaba para realizar este estudio se decidió hacer pruebas solamente con silicatos de etilo en diferentes concentraciones. Además, utilizar un producto que buscara disminuir la expansión hídrica y un producto permitiendo aumentar la conexión entre el consolidante y el entramado interno de la piedra. A continuación se describen los materiales seleccionados para la consolidación y como parte del anexo se presentan las hojas de datos de los fabricantes.

#### **Silicato de etilo:**

Fabricante: Remmers; Loeningen, Alemania

Nombre del producto: Remmers KSE 300

Descripción de producto: Los silicatos de etilo provienen de ácido silícico  $\text{Si}(\text{OH})_4$ . En la producción del silicato de etilo se mezcla el tetracloruro de silicio con alcohol etílico anhidro. Durante los procesos de condensación e hidrólisis se libera dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$  <sub>aq</sub>, “gel de sílice”), un gel amorfo, acuoso como aglomerante. (Wheeler, 2005; Doehne y Price, 2010, Snethlage y Wendler, 2000)

La reacción sigue el esquema:  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4 + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{SiO}_2 \text{ aq} + 4\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$   
(Wheeler, 2005; Snethlage y Wendler 2000)

El silicato de etilo es un ester y su hidrólisis conlleva a un proceso de precipitación del gel (gelificación) de lo cual resulta que éste se contrae y no puede utilizarse para rellenar fisuras grandes y genera porosidad secundaria.

El aglomerante mineral, gel de sílice, sustituye el aglomerante original que se ha perdido por efectos del intemperismo y la meteorización. La velocidad de la reacción de precipitación del gel (gelificación) depende en gran parte de la temperatura y humedad ambiental. En condiciones normales (20° C, 50 % de humedad relativa ambiental) el proceso de gelificación del aglomerante concluye al cabo de aproximadamente tres semanas formando puentes a distancias no mayores de 50µm.

A continuación, se presentan las propiedades más importantes del producto Remmers KSE 300:

- Índice de precipitación de gel aprox. 30 %;

- Sistema monocomponente;

- Manejo seguro y sencillo;

- Catalizador neutro;

- Elevada profundidad de penetración hasta el núcleo sano de la piedra;

- No genera productos secundarios nocivos.

- Elevada resistencia a la intemperie y,

- Estabilidad frente a la radiación ultravioleta.

### **Silicato de etilo elastificado:**

Fabricante: Remmers, Loeningen, Alemania

Nombre del producto: Remmers KSE 300 E

Descripción de producto: El consolidante de piedra elastificado Remmers KSE 300 E fue desarrollado en el marco del proyecto *Protección de superficies de piedra mediante la aplicación de éster del ácido silícico elástico, Aumento moderado del módulo de elasticidad* (comportamiento de tensión – flexión) y consolidación de la textura de la piedra original. (Hilbert y Boos 2001; Snethlage y Wendler 2000)

Este consolidante fue desarrollado a partir de experiencias con silicato de etilo. Como fue descrito, el silicato de etilo al gelificarse no puede hacer puentes a distancias mayores de 50µm.

El silicato de etilo elastificado contiene un componente orgánico, flexible, que impide la contracción del gel. Se trata de segmentos lineales de polidimetilsiloxano. El componente flexible hace que el gel no contraiga y entonces establezca puentes a distancias mayores. Además, al ser flexible puede adaptarse mejor a los ciclos de contracción-dilatación de la estructura rocosa.

A continuación, se presentan las propiedades más importantes del producto Remmers KSE 300 E:

- Índice de precipitación de gel aprox. 30 %.

- Sistema monocomponente.

- Aplicación segura y sencilla.

- Catalizador neutro.

- No genera productos secundarios perjudiciales.

- Elevada resistencia a la intemperie.

- Estabilidad frente a la radiación UV.

### **Diluyente para silicato de etilo:**

Fabricante: Remmers, Loeningen, Alemania

Nombre del producto: Remmers V KSE

Descripción del producto: Diluyente para consolidantes con base en silicatos de etilo. Se trata de hidrocarburos de cadena isoparafínica que se usan para disminuir la concentración del silicato de etilo, por ejemplo del KSE 300. Si se busca alcanzar una alta profundidad de consolidación o evitar un aumento en la dureza de la piedra es recomendable trabajar con un silicato de etilo más diluido. De igual manera, el diluyente se usa para limpiar el área consolidada inmediatamente después de realizada la consolidación pues ello evita una densificación de la superficie y la consecuente alteración de sus propiedades.

Las propiedades más importantes del diluyente son:

- Bajo índice de volatilidad.

- Incoloro e Inoloro.

- Libre de hidrocarburos aromáticos.

### **Producto que tiende a aumentar la conexión entre el consolidante y la estructura interna rocosa ( Primer )**

Fabricante: Fischar

Nombre: Acido tartárico al 0,14 % diluido en alcohol etílico.

Descripción del producto: El ácido tartárico es un compuesto orgánico polifuncional cuyo grupo funcional es el carboxilo. La fórmula química es  $C_4H_6O_6$ .

El ácido tartárico debería aumentar la eficacia de la conexión del silicato de etilo al interior de la piedra (Wendler, 2006) pues ésta molécula presenta grupos bi- y polifuncionales que pueden formar enlaces por puentes de hidrógeno.

El Dr. Wendler hizo las primeras pruebas en la consolidación de tobas con ácido tartárico en concentraciones de 0,03% y 0,3%. De acuerdo a éste autor la afinidad de la superficie pétreo al silicato de etilo aumentó por el cambio de la polaridad de las superficies (Wendler, 2006: 96). La interacción controlada entre las moléculas y la superficie permite que la hidrólisis y la condensación sean eficaces de tal suerte que el gel que permanece en los poros tenga un buen contacto con la zona de la superficie mineral.

### **Producto para disminuir la dilatación hídrica:**

Fabricante: Remmers, Loeningen, Alemania

Nombre del producto: Antihygro

Descripción del producto: Este producto fue desarrollado para disminuir la expansión hídrica de las rocas que contienen arcillas expansivas (Kocher, 2005; Keßler, 2000; Lindner, 1997, Hilbert y Wendler, 1995 ). Con su desarrollo se buscaba disminuir el proceso deteriorante de la expansión hídrica, en particular en piedras areniscas con alto contenido de arcillas expansivas. El producto buscaba además ser utilizado en los casos en los que la consolidación con silicatos de etilo había aumentado la expansión hídrica de la piedra tratada.

El producto es una cadena de amonio que entra en las múltiples y delgadas capas de la molécula de arcilla y se localiza en los lugares ocupados por cationes. El producto, con su carga eléctrica positiva al final de la cadena molecular, se conecta a la carga eléctrica negativa de las capas de la arcilla bloqueando la conexión de los cationes, lo cual impide la formación de capas de hidratos.

Mientras que en muchos estudios se comprobó el efecto del producto, otros casos demostraron que el producto no tenía ninguna influencia sobre la expansión hídrica de la piedra. Este fue el caso de una toba en Rumania donde la aplicación del producto no cambió la alta expansión hídrica (Doelitzscher, 2008).

Las propiedades del producto son:

Concentración de 0,2 Mol/l.

Incoloro e Inholoro

## **7. Condiciones y estudios base para la evaluación de consolidantes**

El estudio y la evaluación de los resultados siguieron la metodología propuesta por Snethlage, Wendler, Sasse, Teutonico. (Snethlage, Wendler 1995; Sasse, Snethlage 1997; Teutonico 1997; Snethlage 1997).

El punto de referencia para evaluar un consolidante son las propiedades de la piedra en su estado original. Al consolidar se busca que las propiedades de la zona consolidada se aproximen a las de la piedra en su estado original y que exista un perfil equilibrado en todas las características hacia el interior de la piedra. La existencia de cambios abruptos entre el interior y el exterior de la piedra puede acarrear consecuencias negativas.

El ideal es llegar a que las zonas consolidadas tengan las mismas propiedades que las de la roca en su estado original. Hoy en día, para evaluar un consolidante, se utilizó el catálogo desarrollado por Snethlage. Este catálogo tiene como base todos los estudios y experiencias desarrolladas desde los años setenta por la disciplina de la conservación de piedra, especialmente en Alemania; define las propiedades y desviaciones que son aceptables. Este catálogo fue la base para la evaluación de la consolidación realizada a las muestras de la toba del Lavapatás.

A continuación se presentan en forma de tablas los estudios reglamentarios, los requisitos para la evaluación y los estudios que se llevaron a cabo.

Los detalles de los estudios realizados, las muestras y dimensiones, la cantidad de las muestras usadas para cada estudio y los resultados de cada uno, se encuentran en el anexo a este documento.

## 7.1 Estudios necesarios para la evaluación de las propiedades de la roca

Tabla 4: Estudios reglamentarios para la evaluación de las propiedades de la roca:

<b>1. Propiedades y características relativas al espacio de poros</b>	
Porosidad accesible al agua	Norma del Instituto Alemán de Normalización DIN 52102
Densidad real y Densidad aparente	Norma DIN 52102
Porosimetría de intrusión de mercurio (PIM)	Norma DIN 66133
Isotermas de adsorción	
<b>2. Características de transporte de humedad</b>	
Coefficiente de absorción de agua por capilaridad en laboratorio	Norma DIN 52617
Permeabilidad al vapor de agua	Norma DIN 52615, "wet-cup"
Expansión hídrica	Norma DIN 52450
<b>3. Resistencia mecánica</b>	
Resistencia de tensión flexión y el módulo estático de la elasticidad	Wittman, Prim 1985. Sattler, 1992. Calculo de acuerdo con Kozub, 2008
<b>4. Otros</b>	
Velocidad de ultrasonido	generador ultrasonido, 350 kHz de frecuencia
Expansión térmica	Norma DIN 53752 Montaje de ensayo desarrollado en Fachhochschule Potsdam, Alemania. (Menzl, Schmeikal 2002)
Propiedades visuales	Estudio no estandarizado, sistema L*a*b
Profundidad de consolidación	Estudio no estandarizado

## 7.2 Condiciones necesarias para la evaluación de la consolidación de piedra

Tabla 5: Condiciones para la evaluación de la consolidación (Snethlage 1997, p. 81.)

Propiedad	Símbolo	Dimensión	Condición
Propiedades visuales / cambio de color	-	-	ningún cambio de color, ningún oscurecimiento, ningún brillo
Coefficiente de absorción de agua	w	Kg/m <sup>2</sup> √h	$W_{tr} \leq w_o$
Profundidad de consolidación	s	cm	más profundo que la zona de humedad máxima $w = 0,1 - 0,5: x = 1 \text{ cm}$ $w = 0,5 - 3,0: x = 3 \text{ cm}$ $w > 3,0: x = 6 \text{ cm}$
Expansión hídrica	$\alpha_{hy}$	mm / m	Ningún aumento frente a la piedra no tratada (máx. aumento aceptable < 20 %) <sup>7</sup>
Expansión térmica	$\alpha_T$	K <sup>-1</sup>	máx. aumento < 20% frente a la piedra no tratada <sup>8</sup>
Factor de resistencia al vapor de agua $\mu$	$\mu$	-	aumento $\leq 20\%$ (aumento $\leq 50\%$ ) <sup>9</sup>
Resistencia de tensión flexión	$\beta_{BZ}$	N / mm <sup>2</sup>	$\beta_{BZ,tr} = \beta_{BZ,o}$ perfil equilibrado, si no: $(\beta_{tr} - \beta_o) / \beta_o < 0,5$ $\Delta\beta_i / \Delta x_o < 0,2 \text{ N/mm}^2 * \text{ mm}$
módulo estático de la elasticidad	E	kN / mm <sup>2</sup>	$E_i \leq 1,5 E_o$ y $E_i / \beta_i \leq E_o / \beta_o$ Y perfil equilibrado $\Delta E / \Delta x \leq 1 \text{ kN / mm}^2 * \text{ mm}$
Velocidad de ultrasonido	$v_p$	km / s	$v_{p,tr} = v_{p,o}$

Índice o: piedra en su estado original, sin tratar Índice tr: piedra tratada Índice x: profundidad

## 7.3 Estudios realizados para evaluar la consolidación de toba

Tabla.6: estudios realizados para evaluar la consolidación de toba

	Estudios realizados
Muestra a evaluar: Piedra proveniente del lecho de la quebrada Lavapatás, muestras provenientes de la roca A. Estudio de las propiedades en una orientación (x), excepto la expansión térmica cuyo estudio fue en dos orientaciones (x, y)	→ densidad real → densidad aparente → porosidad accesible al agua → porosidad por intrusión de mercurio → coeficiente de absorción de agua → absorción de agua relacionada al peso y al volumen de la muestra bajo condiciones normales → factor de resistencia al vapor de agua → expansión hídrica

<sup>7</sup> Snethlage, Wendler (1995), p. 14.

<sup>8</sup> Snethlage, Wendler (1995), p. 14.

<sup>9</sup> Snethlage, Wendler (1995), p. 14.

	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ expansión térmica</li> <li>→ resistencia de tensión flexión</li> <li>→ modulo estatico de elasticidad</li> <li>→ velocidad de ultrasonido</li> <li>→ isotermas de adsorción</li> </ul>
<p>Muestra a evaluar: Piedra aladaña de la Fuente. Muestras provenientes de la <b>roca B</b>. Estudio de las propiedades en una orientación (x),</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ densidad real</li> <li>→ densidad aparente</li> <li>→ porosidad accesible al agua</li> <li>→ coeficiente de absorción de agua</li> <li>→ absorción de agua relacionada al peso y al volumen de la muestra bajo condiciones normales</li> <li>→ factor de resistencia al vapor de agua</li> <li>→ expansión hídrica</li> <li>→ velocidad de ultrasonido</li> </ul>
<p>Muestra a evaluar: Piedra proveniente del lecho de la quebrada Lavapatás, roca A, artificialmente deteriorada. Estudio de las propiedades en una orientación (x), excepto expansión térmica estudio en dos orientaciones (x, y)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ densidad real</li> <li>→ densidad aparente</li> <li>→ porosidad accesible al agua</li> <li>→ coeficiente de absorción de agua</li> <li>→ absorción de agua relacionada al peso y al volumen de la muestra bajo condiciones normales</li> <li>→ factor de resistencia al vapor de agua</li> <li>→ expansión hídrica</li> <li>→ expansión térmica</li> <li>→ resistencia de tensión flexión</li> <li>→ modulo estatico de elasticidad</li> <li>→ velocidad de ultrasonido</li> </ul>
<p>Muestra a evaluar: Piedra aladaña de la Fuente, roca B, artificialmente deteriorada. Estudio de las propiedades en una orientación (x)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ densidad real</li> <li>→ densidad aparente</li> <li>→ porosidad accesible al agua</li> <li>→ coeficiente de absorción de agua</li> <li>→ absorción de agua relacionada al peso y al volumen de la muestra bajo condiciones normales</li> <li>→ factor de resistencia al vapor de agua</li> <li>→ expansión hídrica</li> <li>→ velocidad de ultrasonido</li> </ul>
<p>Muestra a evaluar: Piedra artificialmente deteriorada y consolidada. Muestras proveniente de la roca A, tomada del lecho. Estudio de las propiedades en una orientación (x), excepto la expansión térmica cuyo estudio fue en dos orientaciones (x, y)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ densidad real</li> <li>→ densidad aparente</li> <li>→ porosidad accesible al agua</li> <li>→ coeficiente de absorción de agua</li> <li>→ absorción de agua relacionada al peso y al volumen de la muestra bajo condiciones normales</li> <li>→ factor de resistencia al vapor de agua</li> <li>→ expansión hídrica</li> <li>→ expansión térmica</li> <li>→ resistencia de tensión flexión</li> <li>→ modulo estatico de elasticidad</li> <li>→ velocidad de ultrasonido</li> <li>→ propiedades visuales antes y después de la consolidación</li> <li>→ comportamiento de penetración</li> </ul>
<p>Muestra a evaluar: Piedra artificialmente deteriorada y consolidada. Muestras provenientes de la roca B.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ densidad real</li> <li>→ densidad aparente</li> <li>→ porosidad accesible al agua</li> <li>→ coeficiente de absorción de agua</li> <li>→ absorción de agua relacionada al peso y al volumen de la</li> </ul>

Estudio de las propiedades en una orientación (x)	muestra bajo condiciones normales → factor de resistencia al vapor de agua → expansión hídrica → velocidad de ultrasonido → comportamiento de penetración
---	---

A pesar de que el estudio de secciones delgadas confirmó que la muestra B tenía mucha similitud con la roca original de la Fuente, durante los estudios en laboratorio se visibilizaron varias propiedades que diferían mucho de la roca A. Éstas, entre otras, fueron: la velocidad de penetración de agua y la expansión hídrica. Por esto se decidió no seguir evaluando las muestras de la roca B.

## 8. Series de consolidantes seleccionados

Para la presente investigación, los consolidantes seleccionados fueron utilizados de cinco maneras diferentes denominadas 'series', que se presentan a continuación.

Las series consideraron lo siguiente:

- El estabilizar partes con decohesión con diferentes consolidantes (silicato de etilo y silicato de etilo elastificado, silicato de etilo diluido)
- El posible cambio en la penetración con productos diluidos (uso de silicato de etilo 300 puro y mezclada con una o dos partes de diluyente)
- La posible influencia del silicato de etilo sobre la expansión hídrica y la eficacia de un producto que disminuye la expansión hídrica (Antihygro)
- La posible influencia del Primer que supuestamente mejora la relación entre consolidante y roca (ácido tartárico)
- La posible diferencia entre partes decohesas consolidadas y partes de la piedra en buen estado a las que ha llegado el consolidante, pues es muy probable que, en la consolidación, el consolidante llegue también a partes sanas de la piedra.



Figura 17: Para asegurar la impregnación homogénea de los núcleos, estos se separaron del porta objetos a una distancia de 0,5 cm. En esta foto se observa la impregnación que se hizo con el producto que disminuye la expansión hídrica.

A partir de las condiciones que propone Snethlage 1997 (ver tabla 5) y los resultados del coeficiente de agua en las partes de decohesión (más de  $5 \text{ l/m}^2 \text{ h}^{0,5}$ ), se definió un horizonte necesario para el consolidante de 6 cm. Éste aseguraba que la consolidación fuera efectiva.

### **La serie A**

Los núcleos con los cuales se trabajó en esta serie no fueron sometidos a deterioro artificial. Primero se impregnaron con el producto que inhibe la dilatación hídrica; después de dos semanas de secado se realizó la consolidación de los núcleos usando silicato de etilo diluido 1:1 hasta un horizonte de 4,5 cm. Cuando el horizonte había llegado a esa altura del núcleo se seguía la impregnación con el producto silicato KSE 300.

### **La serie B**

En la serie B los núcleos fueron artificialmente deteriorados y se les aplicó el siguiente procedimiento:

Primero se llevó a cabo la impregnación con el producto para disminuir la dilatación, teniendo en cuenta todo el núcleo. Una vez éste se secó, se realizó la impregnación con ácido tartárico en concentración del 0,14 %, diluido en alcohol, de igual forma, sobre todo el núcleo. Después de una semana de secado se realizó la consolidación con el producto silicato KSE 300 en dos etapas. Se empezó con el producto diluido 1:1 en alcohol etílico. Cuando el producto alcanzó la altura de 4,5 cm se siguió la consolidación con el silicato KSE 300 sin diluirlo.

### **La serie C**

Los núcleos en la serie C fueron artificialmente deteriorados y el procedimiento seguido sobre estas muestras fue el siguiente; se empezó la consolidación con el silicato KSE 300 diluido 1:1 y al haber llegado a una altura de 3 cm se siguió la consolidación con el producto KSE 300 puro.

### **La serie D**

Los núcleos en la serie D fueron artificialmente deteriorados y se les aplicó el siguiente procedimiento; se hizo la consolidación con silicato de etilo diluido 1:1 hasta alcanzar los 3 cm de altura, se siguió entonces con la aplicación del silicato elastificado KSE 300 E.

### **La serie E**

Los núcleos de la serie D fueron artificialmente deteriorados y se siguió el siguiente procedimiento:

En primer lugar se utilizó el silicato de etilo KSE 300 muy diluido en proporción 1:2 hasta alcanzar la altura de 2,5 cm, a partir de ese momento se trabajó con el producto en concentración 1:1. Cuando el producto alcanzó un horizonte de 4,5 cm, se empleó el producto puro.

Nombre de serie	Serie A	Serie B	Serie C	Serie D	Serie E
Estado de conservación	natural	artificialmente deteriorada	artificialmente deteriorada	artificialmente deteriorada	artificialmente deteriorada
Nombre de los núcleos	A1, A6-2, A9	A7, A3, (B4)	A4, A5, A6	A2, A8-1, A8-2	B1, B2-2, B3
Tratamiento contra la expansión hídrica.	X	X			
Impregnación con Primer		X			
Impregnación con silicato de etilo KSE 300 diluido 1:2 en alcohol etílico		X			X
Impregnación con silicato de etilo KSE 300 diluido 1:1 en alcohol etílico	X	X	X	X	X
Impregnación con silicato de etilo KSE 300	X	X	X		X
Impregnación con silicato de etilo KSE 300 E				X	

Tabla 7: resumen de las series de consolidantes.

Previo a la consolidación, los núcleos permanecieron bajo unas condiciones de humedad relativa del 70 %. Para todas las series la consolidación se realizó sobre la superficie de 5 cm de diámetro de cada núcleo. Se buscó en todos los casos que el consolidante penetrara en la piedra mediante un flujo continuo. Una vez finalizada la consolidación se limpió la superficie con alcohol y se almacenaron durante siete semanas bajo condiciones de HR de 80%.

## 9. EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DE LA ROCA PARA DETERMINAR LA EFECTIVIDAD DEL CONSOLIDANTE.

### 9.1 Profundidad de consolidación y tiempo de penetración

La profundidad de consolidación se determinó evaluando la altura del horizonte de absorción que aparecía en cada núcleo una vez el consolidante era absorbido por la roca.

Los productos utilizados en la consolidación fueron: Antihygro, Primer, ácido tartárico, silicato de etilo (KSE 300) puro, silicato de etilo (KSE 300) diluido en una proporción de 1:1 y 1:2 en alcohol etílico y silicato de etilo (KSE 300 E) elastificado.

En todos los núcleos se logró alcanzar el horizonte de 6,5 cm. Sin embargo el tiempo que requirió esta impregnación fue muy largo, la mayoría de los núcleos requirieron entre 4 y 10 horas para absorber el producto hasta este horizonte.

Las diferencias que se observaron entre la profundidad de absorción de los diferentes líquidos fueron mínimas. En muchos casos fueron más evidentes las diferencias en una misma serie, lo que sugiere la heterogeneidad de la estructura pétreo de estas muestras y su influencia sobre la penetración. En las pruebas realizadas no fue posible determinar un líquido que penetrara con más facilidad que otro. Por la alta desviación de los resultados no se evaluaron los resultados usando los promedios de una serie.



Figura 18: Núcleos durante la consolidación con silicato de etilo. Las marcas cada 5 mm facilitan estudiar la velocidad de la penetración.

Cuando comenzó la penetración del consolidante, se observó un comportamiento muy similar en todos los núcleos. Independientemente de la naturaleza del líquido consolidante (diluido, no diluido, diluido en agua como el Antihygro o en alcohol etílico como el ácido tartárico) todos los productos penetraron la estructura rocosa relativamente fácil hasta alcanzar después de una o dos horas un horizonte de aproximadamente 3cm. A partir del horizonte de 3cm, el comportamiento entre los núcleos de todas las series fue muy desigual pero la velocidad de penetración disminuyó para casi todos los casos. De hecho en varios núcleos, como en el A3, la penetración se redujo extremadamente, requiriendo hasta 16 horas en total (si consideramos la duración desde el inicio de la prueba).

Producto	Primer	Antihygro	Sil. de etilo	Antihygro	KSE
Muestra	A3	A3	A3	A6 - 2	A6-2
Estado	artificialmente deterioradas			núcleos sin deterioro	
Altura del horizonte de humedad [cm]	Tiempo				
0,5	0 min	0 min	0 min	0 min	0 min
1	2 min	5 min	3 min	0 min	3 min
1,5	20 min	15 min	8 min	5 min	12 min
2	35 min	25 min	33 min	15 min	23 min
2,5	50 min	45 min	1h 10min	25 min	43 min
3	3h 50min	1h 5min	1h 55min	35 min	1h 10 min
3,5	5h 30min	1h 35min	2h 30 min	50 min	1h 25 min
4	7h 5min	2h 5min	3h 30min	60 min	1h 40min
4,5	8h 45min	3h	5h 20min	1h 20min	2h 15min
5	9h 50min	3h 55min	6h 10 min	2h 10min	3h
5,5	12h 10min	5h 15min	7h 30 min	2h 35min	3h 40min
6	14 h	7h 5min	9h	3h 15min	4h 5min
6,5	<b>16 h</b>	<b>9h 45min</b>	<b>13 h</b>	<b>4h 20 min</b>	<b>5h 25 min</b>

Tabla 8: Relación del tiempo de penetración de los diferentes productos en dos núcleos.

Es muy probable que la rápida penetración que se da al inicio de la prueba está dada por el perfil de deterioro en lo que la parte superior de los núcleos presenta fisuras más anchas y numerosas. Con la disminución de la porosidad y la disminución de las fisuras hacia el interior del núcleo, baja la velocidad de la penetración.

Mientras que en unos núcleos fue posible establecer relaciones entre el coeficiente de agua y la velocidad de la penetración, en otros no fue posible que coincidiera el elevado coeficiente de absorción con una absorción alta. Por ejemplo, el núcleo A7 que tiene el coeficiente más alto de todos los núcleos (11,85 Kg/m<sup>2</sup>√h), pero para alcanzar los 6,5 cm de absorción del silicato de etilo tardó 7 horas mientras que el núcleo A9, con un coeficiente de agua mucho más bajo (5,47 Kg/m<sup>2</sup>√h) tardó 6 horas para que el silicato alcanzara el horizonte de 6.5cm.

Como se mencionó, tampoco se pudo establecer una relación entre el comportamiento y la diferencia química de los productos evaluados. En el núcleo A3 el primero tardó 16 horas en ser absorbido mientras que el Antihygro fue

absorbido en sólo 9 horas 45 min. El tiempo requerido por el silicato de etilo estaba entre estos dos valores temporales (13 horas). La experiencia resultó diferente en el núcleo A7 de la misma serie (serie B) donde el líquido que más rápido entró a la roca fue el Antihygro (4 horas) seguido del primer (5 horas 40min) y finalmente del silicato de etilo (7 horas).

Lo que se pone de manifiesto con estos dos ejemplos es que si la velocidad de penetración es baja, esta es relativamente baja para todos los líquidos.



Figura 19: Núcleos de la serie B, los dos del frente son el A3 y A7. En ambos se empezó la impregnación con el ácido tártrico al mismo tiempo, pero después de varias horas se observaba que los horizontes de humedad habían llegado a niveles muy diferentes.

Tampoco fue posible comprobar que el silicato de etilo más diluido penetrara más rápido que el silicato de etilo elastificado, el cual, por la longitud de sus cadenas moleculares, normalmente es absorbido más lentamente.

Los resultados de la velocidad de penetración indican la dificultad de una posible consolidación *in situ*. Al comienzo los productos entran relativamente fácil pero para alcanzar la profundidad requerida para asegurar una consolidación (6cm mínimo) se puede durar hasta 15 horas (núcleo A6). La penetración de los otros dos productos, Antihygro y ácido tartárico es muy similar.

De lo anterior se deduce que en la Fuente no se puede realizar una consolidación donde el producto se aplique con pincel o aspersor, por el contrario, se necesita asegurar un flujo constante del consolidante a la roca decohesa.

Los resultados, por su heterogeneidad, demuestran que es difícil predecir la manera en la que se va a comportar la piedra con la consolidación, pues puede que una zona sea consolidada sólo en 3horas 15min, como sucedió para el núcleo A4 o que dure 13 horas como en el caso del núcleo A3.

Al mismo tiempo, los resultados demuestran que el rango de velocidad de penetración no permite escoger un consolidante en particular, en la medida en que no se pudieron establecer diferencias entre los diferentes productos.

## 9.2 Porosidad accesible al agua

La porosidad accesible al agua es el volumen de los espacios vacíos de la roca y define su capacidad para almacenar más o menos cantidad de fluido. La roca A de la Fuente tiene unos 30 Vol-%, una porosidad relativamente alta en comparación con otros tipos de roca. Este valor se enmarca en el rango general de las tobas, que en su mayoría son rocas con una alta porosidad.

El deterioro de la roca, debido a la presencia de fisuras, provoca un aumento de ésta porosidad. Sin embargo después de deteriorar las muestras artificialmente no se pudo comprobar de modo claro el aumento de la porosidad por la heterogeneidad del material rocoso de la Fuente, pues ésta era aún del orden de los 26 y 29 Vol-%.

La consolidación, que consiste en la entrada de un material líquido al espacio de los poros y su posterior gelificación, siempre provoca una disminución de la porosidad. Dependiendo del tipo de consolidante y su distribución en la estructura pétreo ésta disminución puede ser mayor o menor. La disminución de la porosidad tiene efectos sobre otras propiedades de la roca como el coeficiente de absorción de agua, la permeabilidad al vapor de agua y la expansión hídrica.



Figura 20: En el estudio de la porosidad accesible al agua las muestras deben absorber agua por capilaridad y después se sumergen 48 horas bajo una capa de 2cm de agua.

En las pruebas realizadas en este estudio, la consolidación causó una disminución de la porosidad en los núcleos de todas las series. Dado que el silicato de etilo es un consolidante que forma placas muy pequeñas, a diferencia de otros consolidantes que forman películas, la porosidad disminuyó sólo de 15% a 25%. Puesto que se usó el silicato de etilo en diferentes concentraciones, la cantidad de gel formado varía y por eso la disminución del espacio poroso es diferente también. En la tabla 9 se presentan los resultados de las cuatro series.

Estos muestran cómo en las partes inferiores de los núcleos, donde llegó el silicato de etilo diluido, la porosidad disminuyó pero no tanto como en las partes superiores donde se hizo el tratamiento con el silicato de etilo más concentrado.

Profundidad [cm]	Porosidad [Vol-%] Roca deteriorada	Reducción de porosidad [%]			
		Serie A	serie B	serie C	serie D
0 - 0,5	27,4	-25,3	-21,3	-23,0	-16,3
0,7 - 1,2	28,2	-19,4	-17,8	-19,4	-13,7
1,4 - 1,9	28,2	-19,3	-20,7	-19,7	-14,9
2,1 - 2,6	28,4	-19,8	-21,9	-19,8	-15,7
2,8 - 3,3	28,0	-19,1	-20,8	-17,1	-11,1
3,5 - 4,0	26,8	-19,1	-20,0	-13,3	-12,4
4,2 - 4,7	26,9	-17,7	-18,7	-15,0	-13,3

Tabla 9: Disminución de la porosidad en las cuatro series de consolidación

Dado que no se pudo determinar el efecto del deterioro artificial sobre la porosidad es apenas normal que después de la consolidación tampoco se evidencien diferencias entre las piedras artificialmente deterioradas y las originales. Tampoco se evidencia un cambio entre el uso del silicato de etilo diluido 1:1 y 2:1. Lo que resulta más sorprendente es que el silicato de etilo elastificado, que forma placas más grandes y por tanto debería causar una reducción más grande de la porosidad, no muestra tampoco mayor diferencia. Por el contrario, es en la serie D donde se evidencia menos reducción de la porosidad.

De lo anterior se deduce que la consolidación tiene un menor efecto sobre la porosidad de la roca, lo que permite anticipar que este tratamiento debería causar pocos cambios en propiedades, como la permeabilidad de la roca. Generalmente se considera favorable si las propiedades de una roca consolidada no difieren mucho de la roca en su estado original.

Para la Fuente de Lavapatás fue establecido que en la mayor parte de la superficie pétreo la absorción de agua y por tanto la porosidad accesible, son muy bajas. Con excepción de la llamada zona blanda, son solamente las áreas con decohesión que tienen una porosidad accesible más alta. Este resultado no resulta tan favorable porque implica que, tras la consolidación, las partes decohesas igual permanecerán con una alta porosidad accesible y entonces estarán absorbiendo más agua que las zonas a su alrededor.

### 9.3 Permeabilidad al vapor de agua

La permeabilidad al vapor de agua describe cuán permeable es un material en relación a las moléculas de agua que se difunden a través de éste. El estudio de la permeabilidad al vapor de agua antes y después de la consolidación brinda información sobre el cambio de la estructura pétreo por la entrada de un consolidante. La consolidación es un proceso que además de provocar una reducción en la porosidad, causa también una disminución en la permeabilidad del material. El aumento del factor de resistencia al vapor de agua (este factor se indica con el símbolo  $\mu$ ) indica el grado de densificación de la roca.

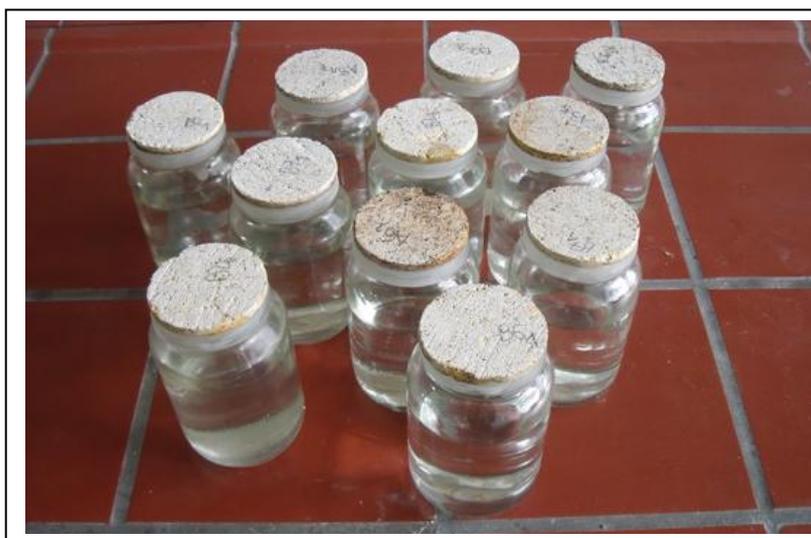


Figura 21: Para el estudio de permeabilidad muestras cilíndricas de roca se fijan con cera a recipientes llenos de agua que se ubican en cámara climática. Más adelante se pesan los recipientes con las muestras para determinar la cantidad de vapor que ha salido a través de éstas.

La consolidación no debería modificar la permeabilidad de la roca y la permeabilidad de la roca consolidada debería ser muy parecida a la de la roca en su estado original.

Si un consolidante reduce de manera importante la porosidad e impide el transporte de vapor de agua en la piedra, puede acarrear una congestión de la humedad al interior de la roca.

Según las condiciones exigidas para una consolidación (Snethlage, 1997; Snethlage y Wendler, 1995), la permeabilidad puede disminuir hasta un 20%. Si es mayor al 20% pueden derivarse consecuencias negativas para la conservación de la roca tratada.



Figura 22: Las muestras para estudiar la permeabilidad al vapor de agua se guardan en una cámara climática.

De la alta porosidad de las tobas también resultan permeabilidades altas. El factor de resistencia al vapor de agua  $\mu$  de la roca A se encuentra entre 11 – 15, corresponde a lo esperado para una toba y es muy bajo comparado con otros tipos de roca. Las pruebas realizadas en la roca antes y después del deterioro artificial demostraron que, como para la porosidad, la permeabilidad al vapor de agua no varió de una a otra.

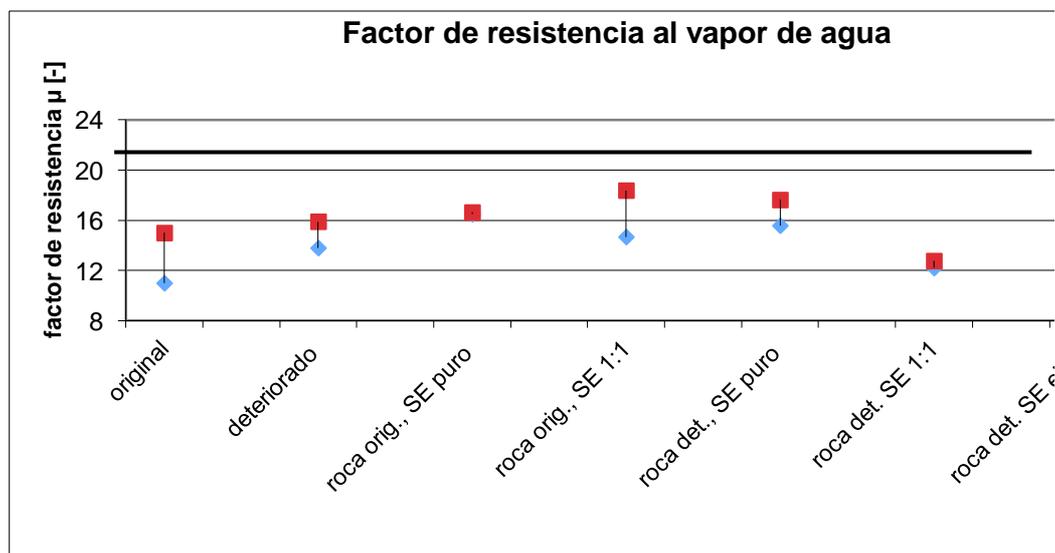


Figura 23: El diagrama presenta los rangos de los valores en el estudio del factor de resistencia al vapor de agua  $\mu$ . La línea negra marca el límite aceptable del aumento según Snethlage, Wendler 1995, Snethlage 1997. SE = silicato de etilo; SE 1:1 silicato de etilo diluido 1:1 en alcohol etílico.

Como era de esperar, la consolidación aumentó la densidad de todas las muestras tratadas. De igual manera, la densidad aumentó menos cuando el producto consolidante utilizado fue menos concentrado (silicato de etilo diluido 1:1) y aumentó más cuando el producto fue más concentrado (silicato de etilo puro).

Con excepción de la roca tratada con el silicato de etilo diluido 1:1, en todas las series el factor de resistencia al vapor de agua aumentó por encima del factor de resistencia al vapor de agua de la piedra en su estado original. Pero con un factor  $\mu$  entre 15 y 18 casi todas las muestras se encuentran todavía en el límite definido por Snethlage, 1997. Solamente las muestras tratadas con el silicato de etilo elastificado sobrepasan ligeramente lo establecido por las condiciones.

Se puede resumir que, con excepción del consolidante silicato de etilo elastificado, los consolidantes aumentan la densidad en un marco aceptable, lo que quiere decir que la consolidación no debería causar problemas como la congestión de humedad.

#### 9.4 Coeficiente de absorción de agua

El coeficiente de absorción de agua describe con qué velocidad un material absorbe el agua. Puesto que el agua juega un papel importante en el deterioro de la piedra, la velocidad de penetración da información sobre el posible impacto del agua sobre la estructura pétreo. El coeficiente de absorción de agua depende entre otras cosas, de la porosidad de la roca, del tipo y de la geometría de los poros.

Como se mencionó anteriormente para las propiedades de la porosidad y la permeabilidad de la roca, el coeficiente de absorción de agua, debido a la solidificación de un consolidante en la estructura pétreo generalmente, también resulta más baja después de la consolidación.



Figura 24: Dos núcleos de la serie A durante el estudio del coeficiente de absorción de agua. Se observa que si bien los dos núcleos pertenecen a la misma serie y deberían mostrar un comportamiento similar, un núcleo casi no absorbe agua mientras que el otro (A6-2) presenta un horizonte de humedad más elevado.

Como el agua es considerada como factor importante de los procesos de deterioro, las condiciones para la evaluación de la consolidación consideran como positivo la reducción del coeficiente de absorción de agua después del tratamiento.

El coeficiente de absorción de agua en los núcleos originales muestra desde  $3,96 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0,5}$  hasta  $10,65 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0,5}$  lo que constituye un rango amplio de valores y valida la heterogeneidad de la toba de la Fuente. Pese a lo anterior, según las clasificaciones de rocas en relación a su densidad a agua, esta roca se clasifica en la categoría de “alta absorción “ (Bliefert & al. 1997). Como se describió en detalle en el capítulo sobre el deterioro artificial es debido a éste deterioro que el coeficiente aumentó aún más en todos los núcleos.



Figura 25: El estudio del coeficiente de absorción de agua en dos núcleos de la serie C. Aquí también se observa que mientras que en el núcleo A4 el horizonte de humedad es elevado, en el núcleo A6 el agua casi no ha ascendido.

En la siguiente tabla se presentan los resultados del estudio del coeficiente de absorción de agua después de la consolidación.

Serie	Núcleo	Coeficiente de absorción de agua antes de la consolidación [kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> ]	Coeficiente de absorción de agua después de la consolidación [kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> ]	Disminución [%]
A Sin det. art.	A1	7,08	1,71	<b>75%</b>
	A6-2	10,4	6,27	<b>40%</b>
	A9	6,4	6,4	<b>0%</b>
B	A3	6,49	4,81	<b>25%</b>
	A7	11,85	8,49	<b>28%</b>
C	A4	10,45	10,08	<b>3,5%</b>
	A5	7,56	4,85	<b>35%</b>
	A6	6,19	3,4	<b>45%</b>
D	A2	15,87	10,1	<b>36,4%</b>
	A8-1	6,85	6,54	<b>4,5%</b>
	A8-2	7,2	6,5	<b>10,0%</b>

Tabla 10: Resultados del estudio del coeficiente de absorción de agua y su disminución por la consolidación.

Con excepción de una muestra de la serie A, la velocidad de absorción de agua, se reduce con la consolidación en todos los núcleos. Debido a que los resultados de la disminución del coeficiente de absorción de agua fueron muy dispersos no fue posible trabajar con promedios en cada serie.

La diversidad y el alto rango de resultados dentro de cada una de las series no permite deducir diferencias entre los diferentes tratamientos. Es sorprendente que el silicato de etilo elastificado, que forma placas de gel más grandes, no reduzca más el coeficiente de agua.

En resumen, todos los tratamientos reducen la absorción de agua lo que resulta favorable según las condiciones para la evaluación de consolidantes. En la Fuente una disminución aún más alta del coeficiente sería más favorable pues alrededor de las zonas decohesas la absorción sí es muy baja. Sería también muy bueno que las partes decohesas tuvieran un comportamiento parecido.

## 9.5 Expansión hídrica

La expansión hídrica describe la propiedad de los materiales para aumentar su volumen cuando el agua entra en su estructura. Un factor que influye en la expansión de estructuras pétreas es la presencia de arcillas expansivas. La presencia de estas arcillas junto con una alta absorción de agua produce altas expansiones.

Como demostraron los estudios geológicos de la Fuente, las arcillas expansivas están presentes en la totalidad de su área, en forma de halloisita y alófana. A pesar de la presencia de éstas arcillas, no es en su totalidad que exista la misma absorción, por ello, se deduce que en partes que no absorben agua tampoco se puede generar una expansión hídrica importante.

Pero son las zonas con decohesión, la llamada zona blanda, y la roca A que se caracterizan por una alta absorción de agua.

No es sorprendente entonces que los núcleos de la roca A sí muestren una expansión hídrica entre 0,81 – 1,57 mm/m lo que se puede clasificar como expansión alta. De éste resultado se deduce que también la zona blanda y las zonas decohesas muestran una expansión hídrica, que según los valores encontrados, se considera como un factor importante de deterioro.

Es entonces que en partes de la Fuente donde la roca absorbe mucha agua, la expansión hídrica debe impactar en el deterioro de la Fuente.



Figura 26: Se observan tres núcleos, dos en recipientes transparentes, uno en recipiente de aluminio durante el estudio de la expansión hídrica.

Las condiciones para la evaluación de consolidantes establecen que no se puede permitir un aumento de la expansión hídrica a causa de una consolidación. Es más, si la expansión hídrica es alta, el tratamiento de conservación de la piedra a tratar, debe buscar reducir esta expansión. (Snethlage, Wendler, Klemm 1995; Lindner 1997, Keßler 2000, Doelitzscher 2005)

Es por ésta razón que en este estudio se usó el Antihygro, producto diseñado para disminuir la expansión hídrica y se evaluó la influencia de la consolidación sobre la expansión hídrica y el efecto de la combinación del consolidante y el producto Antihygro sobre la misma.

La siguiente tabla resume los resultados del estudio de la expansión hídrica.

Muestra	Expansión hídrica [mm/m] antes del trat.	Expansión hídrica [mm/m] tras Antihygro	Expansión hídrica [mm/m] tras consolidación
en su estado original			
A1	0,8840	0,7888	0,797
A9	0,9484	0,4917	0,752
A6 2	0,8157	0,5755	1,193
art. deteriorada			
A3	1,5907	0,5446	0,554
A7	0,9617	0,4122	0,524
A4	1,5667	ningún tratamiento	1,382
A5	1,1563	ningún tratamiento	1,051
A6	0,8900	ningún tratamiento	0,964

Tabla 11: Resultados del estudio de la expansión hídrica realizado en muestras de la roca original, la roca deteriorada, la roca tratada con Antihygro y la roca consolidada.

Los resultados muestran que mientras en un núcleo la expansión disminuyó en un 10 %, en otros cuatro núcleos la expansión bajó entre un 30% y un 60%. El estudio comprueba entonces que el producto Antihygro reduce la expansión hídrica de la toba de la Fuente Lavapatás.

Igual se pudo comprobar que la consolidación por sí misma no aumenta la expansión hídrica. En los núcleos de la serie C (A4, A5, A6) que no fueron tratados con Antihygro se observa, aunque con pequeñas variaciones, que la expansión presenta valores altos y similares antes y después de la consolidación.

Los resultados de las primeras muestras tratadas con Antihygro y después consolidadas resultan ser más heterogéneos. En las dos muestras artificialmente deterioradas se logró reducir la expansión hídrica con el Antihygro en aproximadamente un 50%, y los valores permanecen así después de la consolidación con el silicato de etilo.

Diferente es la reacción en la serie A, en la que no se deterioraron artificialmente los núcleos. Mientras que primero con el tratamiento en el que se aplica Antihygro se logró reducir la expansión hídrica, posteriormente a la consolidación ésta aumentó recobrando el nivel inicial. Aún más, en el caso de la muestra A 6-2 la expansión aumentó considerablemente.

Una posible explicación para este comportamiento tan diferenciado entre las muestras de roca en su estado original y las de roca deteriorada, es que en el

interior de la roca en su estado original el espacio de poros es menor, así como la cantidad de fisuras y la anchura de las mismas. Vemos entonces que las placas de gel que se forman por el consolidante logran cohesionar estos espacios y conectar bien la estructura. Cuando entra el agua, a causa de una mejor conexión de la estructura pétreo, hay una mejor transmisión del movimiento expansivo, debido a este fenómeno la roca se expande otra vez considerablemente. En las muestras deterioradas, en cambio, las placas de gel logran cohesionar las fisuras en menor intensidad, esto hace que la conexión de la estructura sea menos efectiva y que la transmisión de la expansión sea menor.

De lo mencionado se concluye lo siguiente:

En términos generales la aplicación del consolidante cumple con el requisito principal de no aumentar la expansión hídrica.

El producto Antihydro logra bajar la expansión hídrica en zonas deterioradas que una vez después de la consolidación esta expansión queda disminuida.

En zonas no deterioradas el Antihydro baja la expansión pero ésta sube otra vez después de la consolidación. Este fenómeno lleva la hipótesis de que sin el uso del producto Antihydro la expansión en partes sanas que absorben algo de agua, después de la consolidación la expansión sería todavía más alta lo que no cumpliría con los requisitos.

Considerando los resultados del estudio del Antihydro junto a la situación en la Fuente de que las zonas decohesas se expanden más que las zonas con poca absorción en su alrededor, resulta favorable usar el producto Antihydro para reducir la expansión hídrica en las zonas con decohesión. Se pudo mostrar además que la posible entrada de Antihydro en partes más sanas cerca de las zonas decohesas igual es favorable.

## **9.5 Expansión térmica**

La expansión térmica es la característica de los materiales de expandirse con el cambio de temperatura.

Los cambios en la temperatura pueden provocar procesos de expansión y contracción que a su vez pueden provocar tensiones en la estructura pétreo. En piedras porosas la conductividad térmica no es muy alta. Este fenómeno puede provocar que la zona cerca a la superficie de la roca sea más caliente y tenga una expansión térmica diferente a la de la zona interna. Este fenómeno genera tensiones de cizallamiento.

Con el fin de evitar tensiones la expansión térmica de la roca consolidada no debería diferir de la expansión de la roca en su estado original. Snethlage y

Wendler (1995) determinan que un aumento hasta del 20% en la expansión térmica de la roca en su estado original resulta todavía aceptable.

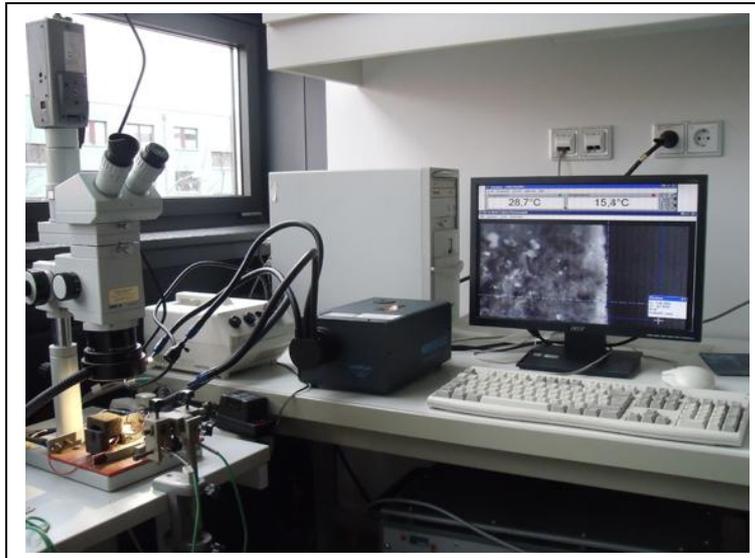


Figura 27: Montaje del ensayo para el estudio de la expansión térmica en los laboratorios de la Fachhochschule Potsdam, Alemania.

Los resultados de esta investigación pueden servir solamente como un acercamiento a la problemática de la expansión térmica debido a dos factores:

1. El montaje disponible en los laboratorios de la Universidad de Potsdam se diseñó para el estudio de muestras muy pequeñas. Dado que la toba se caracteriza por su composición heterogénea con partículas muy finas y fragmentos bastante grandes el estudio debería considerar muestras de mayor tamaño, sin embargo las muestras usadas eran pequeñas y no tenían fragmentos de roca grandes.
2. Debido al tiempo limitado con el que se contaba en este estudio no se pudieron evaluar un gran número de muestras, hecho que limita los resultados e impide llegar a conclusiones más detalladas.

Figura 28: Muestras usadas para el estudio de la expansión térmica.



Los resultados del estudio se presentan resumidos en la siguiente tabla y en la figura 29.

Descripción de la muestra y orientación (x,y)	Aumento de temperatura [°C]	Expansión térmica [mm/m]	Coefficiente de expansión [10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]
roca en su estado original (x)	20 a 30	0,019	3,38952E-06
	20 a 40	0,091	5,5302E-06
	20 a 50	0,167	6,20762E-06
	20 a 60	0,242	6,56576E-06
roca en su estado original (y)	20 a 30	0,047	4,05952E-06
	20 a 40	0,094	4,36023E-06
	20 a 50	0,182	5,74793E-06
	20 a 60	0,242	5,82163E-06
roca artif. det. (x)	20 a 30	0,023	2,27281E-06
	20 a 40	0,045	2,26139E-06
roca consolidada SE 300	20 a 50	0,165	5,50529E-06
	20 a 60	0,187	4,6913E-06
roca artif. det. (y)	20 a 30	0	0
	20 a 40	0	0
roca consolidada SE 300	20 a 50	-0,055; 0,047	1,509E-06; -1,914E-06
	20 a 60	-0,126; 0,094	2,283E-06; -3,247E-06
roca artif. det. (x)	20 a 30	0,047	5,22603E-06
	20 a 40	0,114	6,002E-06
roca consolidada SE 300 E	20 a 50	0,160	5,53585E-06
	20 a 60	0,181	4,63942E-06
roca artif. det. (y)	20 a 30	0,027	2,99056E-06
	20 a 40	0,106	5,62693E-06
roca consolidada SE 300 E	20 a 50	0,158	5,49729E-06
	20 a 60	0,158	4,0768E-06
roca en su estado original (x)	20 a 30	0,046	4,68569E-06
	20 a 40	0,093	4,66214E-06
roca consolidada SE 300 E	20 a 50	0,278	9,3087E-06
	20 a 60	0,325	8,1383E-06
roca en su estado original (y)	20 a 30	0	0
	20 a 40	0,050	2,64634E-06
roca consolidada SE 300 E	20 a 50	0,100	3,45495E-06
	20 a 60	0,149	3,84675E-06

Tabla 12: Resultados del estudio de la expansión hídrica. Se presentan los promedios excepto en los casos en los que la desviación entre los resultados es muy grande.

Se observa que la roca en su estado original presenta expansión térmica al aumentar la temperatura de 20°C a 30°C. Esta expansión, en datos absolutos 0,019

mm/m (orientación x) hasta 0,047 mm/m (orientación y), es sin embargo muy pequeña en comparación con la expansión que la roca presenta cuando absorbe agua (en promedio 1,05 mm/m). Los datos indican que la expansión térmica disminuye con el deterioro. Se deduce que las fisuras que se forman al interior de la roca son las que compensan la expansión total.

Después de la consolidación la expansión térmica aumenta otra vez porque el consolidante conecta mejor el material y la expansión del material se transmite. Entre las diferentes series de consolidación no se registraron diferencias importantes. El silicato de etilo elastificado parece aumentar la expansión hídrica más que el silicato de etilo, sin embargo este aumento se enmarca dentro del límite aceptable.

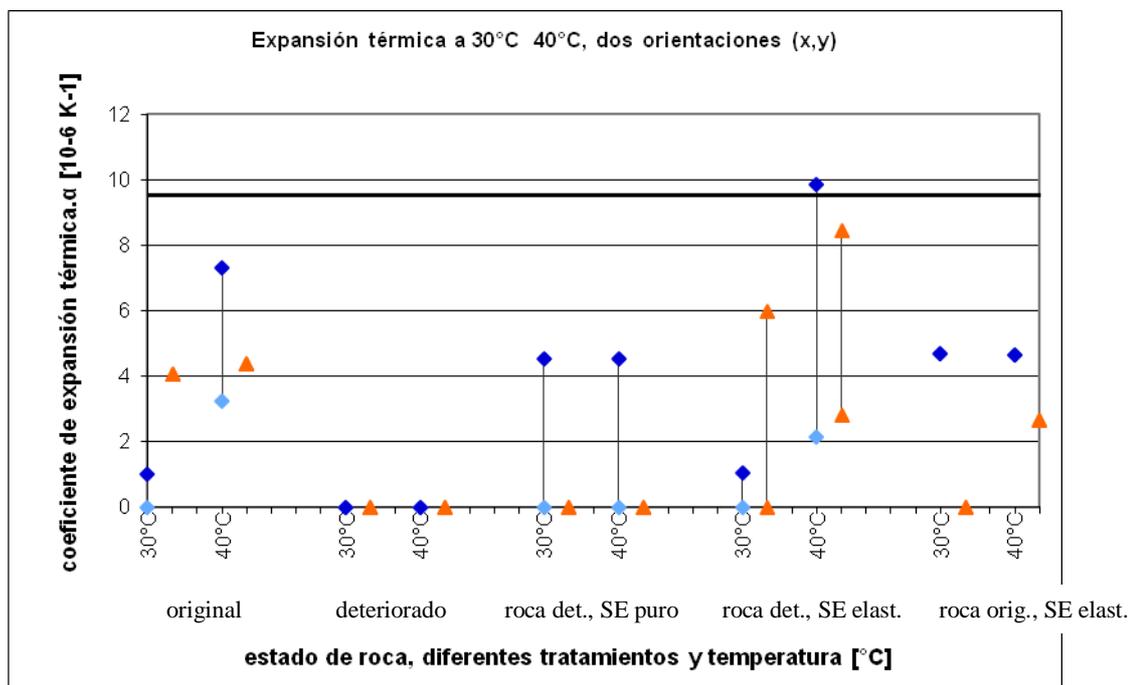


Figura 29: Diagrama donde se presenta el rango de los resultados del estudio de la expansión térmica. En azul la orientación 'x', en amarillo la orientación 'y'. No se evaluaron en todas las series varias muestras, para las cuales no se marca un rango sino solo un punto. La línea negra marca el límite aceptable del aumento de expansión térmica según Snethlage, Wendler 1995; Snethlage 1997.

Como en la Fuente no se registraron temperaturas superficiales superiores a 33°C la evaluación presentada aquí se enfocó solamente en los cambios que se dan a 30°C y máximo a 40°C. Los resultados demuestran que hay una cierta expansión de la roca a éstas temperaturas. La roca consolidada se comporta de forma muy parecida a la roca en su estado original lo que permite concluir que la consolidación no tiene un efecto negativo sobre la expansión térmica.

## 9.7 Cambio de color

La refracción de la luz después de la aplicación de un consolidante puede cambiar. En consecuencia puede resultar un cambio en la apariencia (color, brillo) de la superficie tratada.

Las condiciones para la evaluación de la consolidación prohíben cualquier cambio de la superficie consolidada. La evaluación del cambio de la apariencia se hace de forma visual y midiendo el color mediante el procedimiento de tres gamas ( $L^*a^*b^*$ ).



Figura 30: Las muestras para estudiar los efectos del consolidante sobre la roca.

Generalmente los productos de silicato de etilo se conocen porque no provocan ningún cambio o generan solo cambios mínimos en la apariencia de la superficie. Generalmente después de cuatro semanas de la consolidación desaparecen los efectos de oscurecimiento. Sin embargo el proceso puede durar hasta medio año después del tratamiento. Por lo cual, los resultados de este estudio aún no se pueden dar a conocer.

Sin embargo ya es posible dar una mirada a lo que acontecerá. A simple vista a las cuatro semanas ya no se observó ningún oscurecimiento de la superficie comparando muestras sin tratar y muestras tratadas a la vez.

Adicionalmente se deberían considerar las condiciones en la Fuente. La apariencia de la roca es muy heterogénea y las superficies no muestran la calidad de blancura que presentaron los núcleos. En muchas zonas el crecimiento microbiológico tiene un impacto alto sobre la apariencia de la roca.

Con estas dos observaciones ya es posible anticipar que los consolidantes no generan cambios marcados en la superficie y que entonces el cambio de color no es un criterio suficiente para descalificar uno de los consolidantes usados.

## 9.8 La velocidad de ultrasonido

La velocidad del ultrasonido da información sobre el estado de una roca. Las ondas longitudinales no pueden atravesar cavidades o fisuras y por eso tienen que esquivarlas. Una estructura rocosa con muchas fisuras y/o cavidades tiene una velocidad baja y un material con menos fisuras tiene una velocidad mayor.

De igual manera se aplica la velocidad del ultrasonido para estudiar las diferencias que se darán dentro de un material antes y después de la consolidación.

El consolidante va llenando espacios y fisuras y según la manera en la que se llenan los espacios, la velocidad del ultrasonido va aumentando. Para cumplir con los requisitos la consolidación debería generar un perfil equilibrado con una velocidad del ultrasonido cercana al valor de la roca en su estado original.

La velocidad del ultrasonido en la roca en su estado original fue de 1 km/s, en la medición realizada a lo largo de los núcleos (entre 6 y 10 cm de distancia) y, de 1 y hasta 2 km/s en la medición realizada en el diámetro (5 cm de distancia).

Esta diferencia puede deberse a: (i) el error sistemático del ultrasonido que viaja más rápido en distancias muy cortas (5 cm), y (ii) los núcleos se extrajeron de forma vertical (perpendicular) a la textura de la roca, lo que significa que al medir la altura del núcleo se mide vertical a la textura y entonces vertical a las discontinuidades que reducen mucho la velocidad. (anexo II)

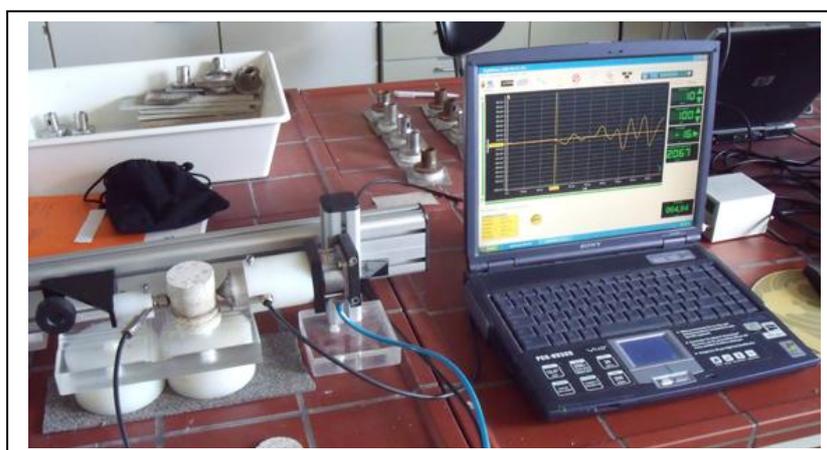


Figura 31: Medición de la velocidad de ultrasonido sobre el diámetro de un núcleo.

Como se mencionó detalladamente en el capítulo del deterioro artificial no se pudo comprobar ningún cambio de la velocidad de ultrasonido con el deterioro de los núcleos. La velocidad medida en la roca en su estado original así como la medida en la roca deteriorada es relativamente baja en relación con mediciones

de otros estudios de tobas, donde el promedio se encuentra alrededor de 2 km/s. La velocidad ultrasónica entonces da testimonio de la cantidad de discontinuidades que encontramos en la toba de la Fuente de Lavapatatas.

Después de la consolidación y tomando la medición en el sentido de la altura de los núcleos (entre 6 y 10 cm de distancia) en la mayoría de los casos no se pudo constatar un aumento de la velocidad de ultrasonido. Este resultado hace referencia a la gran cantidad de discontinuidades y fisuras que siguen afectando el viaje de la onda.

Al realizar la medición de la velocidad de ultrasonido sobre el diámetro (5cm) de los núcleos se logró registrar un aumento en la velocidad en todos los núcleos. El siguiente diagrama permite visualizar el cambio de la velocidad en todas las series y comparar la roca deteriorada y la roca en su estado original.

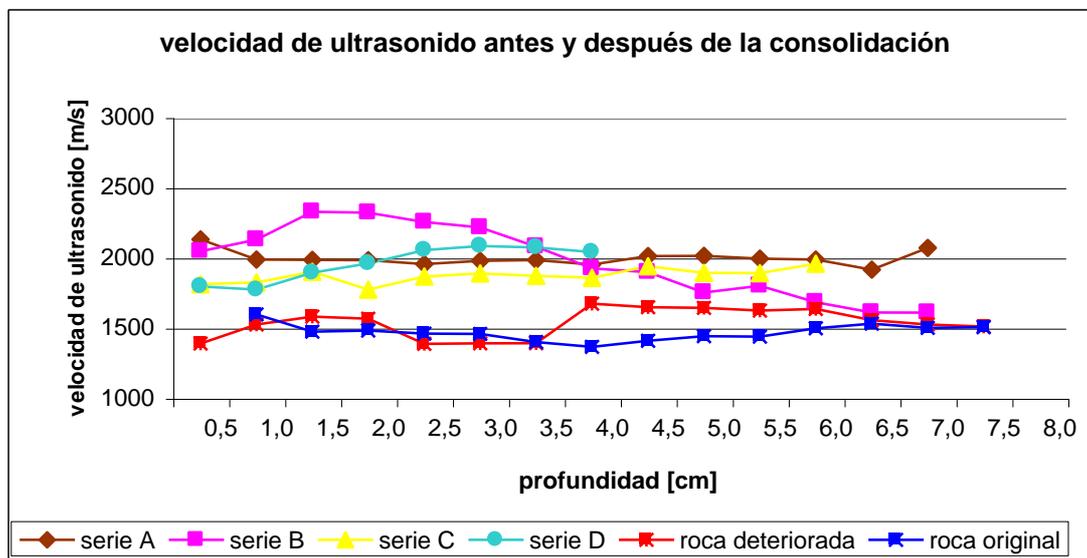


Figura 32: Diagrama de los resultados del estudio de velocidad del ultrasonido (medición sobre el diámetro de los núcleos). Se presenta el promedio de cada serie.

Los resultados de las series A, C y D son muy parecidos. Lo que llama la atención es el aumento marcado entre 1 y 2,5 cm del grupo B. En esta se usó el Primer (ácido tártrico) para mejorar la conexión entre la estructura interna de la piedra y el consolidante. El fuerte aumento de la velocidad podría estar dado por el efecto del Primer que en esa zona hace que el consolidante se conecte mejor y por eso la onda viaja más rápido. Sin embargo, al mismo tiempo, en la parte inferior del núcleo que se trató de la misma manera, no se ve ningún efecto parecido. Esta zona inferior fue tratada con el consolidante muy diluido (silicato de etilo 1:2 en alcohol etílico) lo que generó una menor cantidad de gel y como consecuencia un menor aumento en la velocidad de ultrasonido.

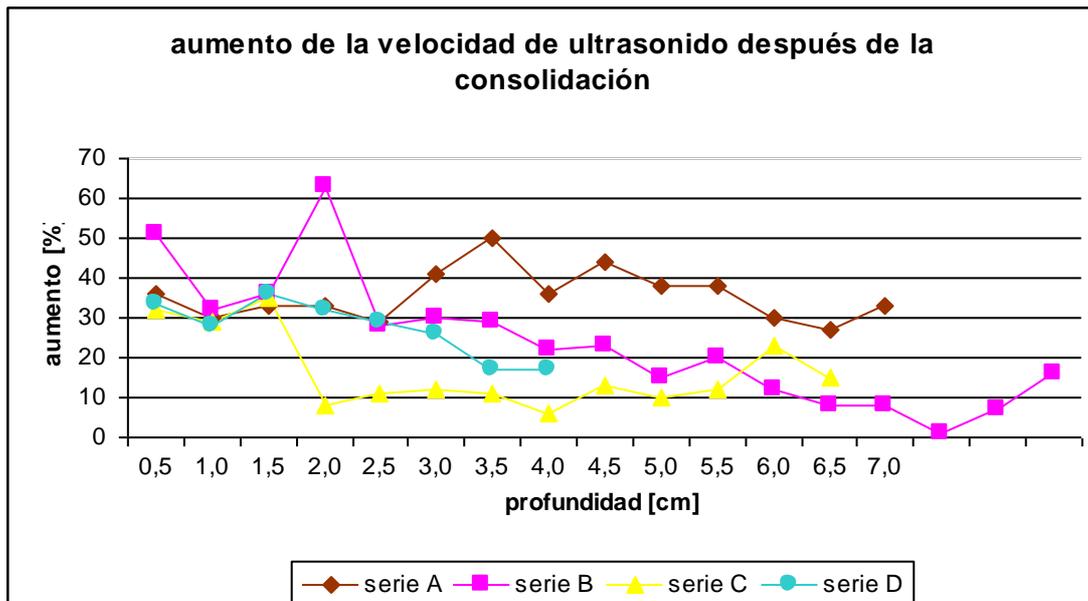


Figura 33: Diagrama que muestra el aumento de la velocidad del ultrasonido [%] en las cuatro series de consolidación.

Los resultados de la velocidad de ultrasonido muestran que mediante la consolidación se depositó en todos los núcleos un consolidante que llenó hasta un cierto nivel los poros y fisuras y generó entonces un aumento de la velocidad de ultrasonido. En las partes superiores de los núcleos se trabajó con concentraciones más altas y por tanto ahí se depositó más gel generando un aumento en la velocidad del ultrasonido. El aumento era menos marcado en las partes inferiores de los núcleos dado que estas zonas fueron tratadas con un consolidante menos concentrado.

La consolidación con productos de diferentes concentraciones permitió obtener un perfil equilibrado hacia el interior de la piedra, lo que cumple con las condiciones. Caso diferente es el aumento de la velocidad en el grupo B, que podría estar asociado al uso del ácido tártrico, lo que implicaría que su aplicación no es favorable.

de otros estudios de tobas, donde el promedio se encuentra alrededor de 2 km/s. La velocidad ultrasónica entonces da testimonio de la cantidad de discontinuidades que encontramos en la toba de la Fuente de Lavapatas.

Después de la consolidación y tomando la medición en el sentido de la altura de los núcleos (entre 6 y 10 cm de distancia) en la mayoría de los casos no se pudo constatar un aumento de la velocidad de ultrasonido. Este resultado hace referencia a la gran cantidad de discontinuidades y fisuras que siguen afectando el viaje de la onda.

Al realizar la medición de la velocidad de ultrasonido sobre el diámetro (5cm) de los núcleos se logró registrar un aumento en la velocidad en todos los núcleos. El siguiente diagrama permite visualizar el cambio de la velocidad en todas las series y comparar la roca deteriorada y la roca en su estado original.

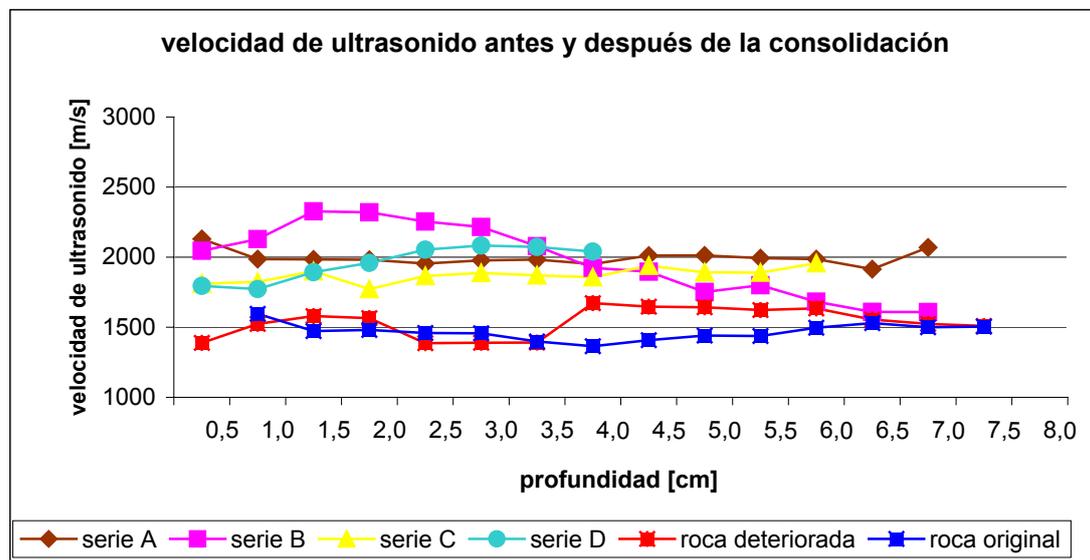


Figura 32: Diagrama de los resultados del estudio de velocidad del ultrasonido (medición sobre el diámetro de los núcleos). Se presenta el promedio de cada serie.

Los resultados de las series A, C y D son muy parecidos. Lo que llama la atención es el aumento marcado entre 1 y 2,5 cm del grupo B. En esta se usó el Primer (ácido tártrico) para mejorar la conexión entre la estructura interna de la piedra y el consolidante. El fuerte aumento de la velocidad podría estar dado por el efecto del Primer que en esa zona hace que el consolidante se conecte mejor y por eso la onda viaje más rápido. Sin embargo al mismo tiempo en la parte inferior del núcleo que se trató de la misma manera no se ve ningún efecto parecido. Esta zona inferior fue tratada con el consolidante muy diluido (silicato de etilo 1:2 en alcohol etílico) lo que generó una menor cantidad de gel y como consecuencia un menor aumento en la velocidad de ultrasonido.

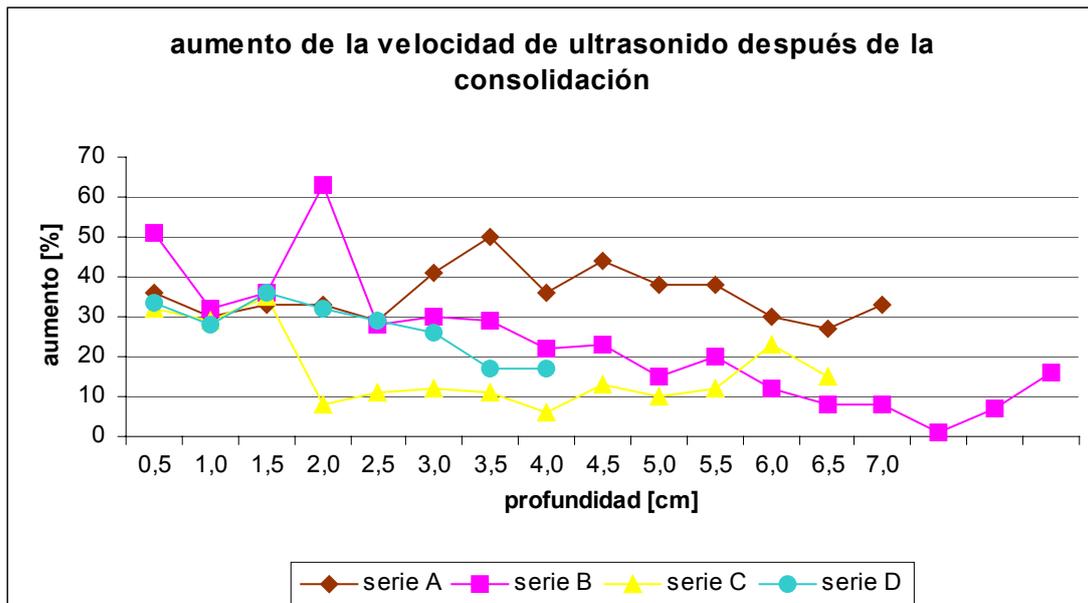


Figura 33: Diagrama que muestra el aumento de la velocidad del ultrasonido [%] en las cuatro series de consolidación.

Los resultados de la velocidad de ultrasonido muestran que mediante la consolidación se depositó en todos los núcleos un consolidante que llenó hasta un cierto nivel los poros y fisuras y generó entonces un aumento de la velocidad del ultrasonido. En las partes superiores de los núcleos se trabajó con concentraciones más altas y por tanto ahí se depositó más gel generando un aumento en la velocidad del ultrasonido. El aumento era menos marcado en las partes inferiores de los núcleos dado que estas zonas fueron tratadas con un consolidante menos concentrado.

La consolidación con productos de diferentes concentraciones permitió obtener un perfil equilibrado hacia el interior de la piedra, lo que cumple con las condiciones. Caso diferente es el aumento de la velocidad en el grupo B, que podría estar asociado al uso del ácido tártrico, lo que implicaría que su aplicación no es favorable.

### 9.9 Resistencia de tensión-flexión y modulo de elasticidad

Con el estudio de la resistencia de tensión-flexión se mide la dureza real de la roca. Según las condiciones para la evaluación de la consolidación, la dureza de la roca consolidada debería alcanzar la dureza de la roca en su estado original. Se busca generar un perfil homogéneo hacia el interior de la piedra. El límite máximo tolerable de dureza es 1.5 veces mayor que el valor de la roca en su estado original. Si la roca consolidada resulta mucho más dura o el perfil alcanzado resulta poco equilibrado hay un alto riesgo de daños hacia futuro.

Con el depósito de material sólido al interior del espacio poroso la roca consolidada se vuelve más dura pero también más rígida. Si la estructura rocosa

se vuelve muy rígida pierde la capacidad de absorber tensiones como las que se generan por la expansión hídrica o la expansión térmica. Cuando se generan tensiones en una roca muy rígida la roca se empieza a fracturar. Por eso es de gran importancia que la rigidez de la roca después de la consolidación no aumente mucho.

La rigidez de la roca se mide mediante el módulo de elasticidad. En este estudio se evaluó el módulo estático de elasticidad. Las condiciones establecen que un aumento de este módulo hasta en un 1.5 más que el valor de la roca en su estado original es aceptable.



Figura 34: El estudio de resistencia de tensión-flexión realizado en el laboratorio de la Fachhochschule Potsdam.

Para la roca en su estado original se determinó un rango de la dureza de 1,4 a 3,4 N/mm<sup>2</sup> y un módulo estático de elasticidad entre 0,22 y 0,82 kN/mm<sup>2</sup>. La dureza es relativamente baja en comparación con otros tipos de roca pero se encuentra en el rango de valores de las tobas que son rocas bastante blandas. El módulo estático de la toba es muy bajo lo que significa que el material es bastante elástico lo cual resulta muy favorable.

Tras el deterioro artificial las muestras mostraron un perfil de deterioro donde la parte superior del núcleo es más blanda que la inferior y, la dureza se acercaba a los valores de la roca en su estado original. El rango de los valores decreció llegando a una dureza superficial mínima de 1,1 N/mm<sup>2</sup> y un módulo estático mínimo de solo 0,13 kN/mm<sup>2</sup>.

En el siguiente diagrama se presentan los resultados promediados de cada serie de consolidación. La consolidación aumentó la resistencia de tensión-flexión en cada una de las cuatro series. Las pruebas realizadas sobre los núcleos demuestran que en la totalidad de su área la dureza aumentó por encima de la dureza de la roca en su estado original y que el perfil de dureza obtenido no es muy equilibrado.

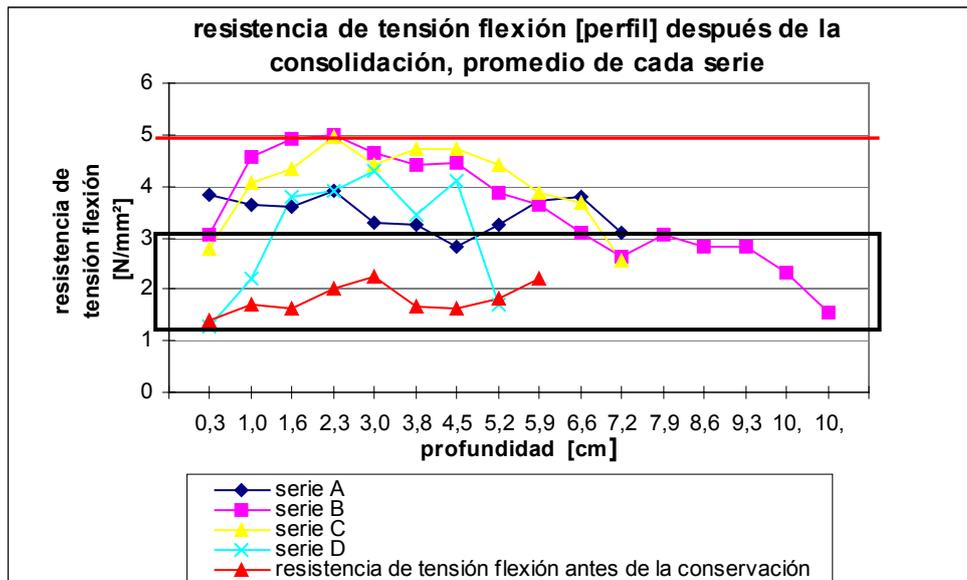


Figura 35. Diagrama del perfil de la resistencia tensión flexión en las cuatro series. El rectángulo negro marca los valores de la roca en su estado original mientras que la línea roja marca el límite máximo aceptable de dureza.

De acuerdo a lo mencionado para otras propiedades, cada serie presentó resultados muy heterogéneos. Es por esta razón y por la importancia fundamental de la dureza y el módulo estático de elasticidad, que en esta evaluación se presentan y discuten los resultados para cada serie.

En la serie A se trabajó con la piedra en su estado original la cual se consolidó en su parte inferior con silicato de etilo diluido 1:1 y en su parte superior con silicato de etilo puro.

En el diagrama correspondiente a la figura 36 se observa la heterogeneidad de los tres núcleos estudiados. La consolidación aumentó suficientemente la dureza de la piedra. Mientras que la dureza obtenida en el núcleo A1 sobrepasa mucho el límite aceptable, los resultados son más equilibrados en los otros dos núcleos. El perfil de dureza no es muy equilibrado pero en general la dureza permanece en un marco aceptable.

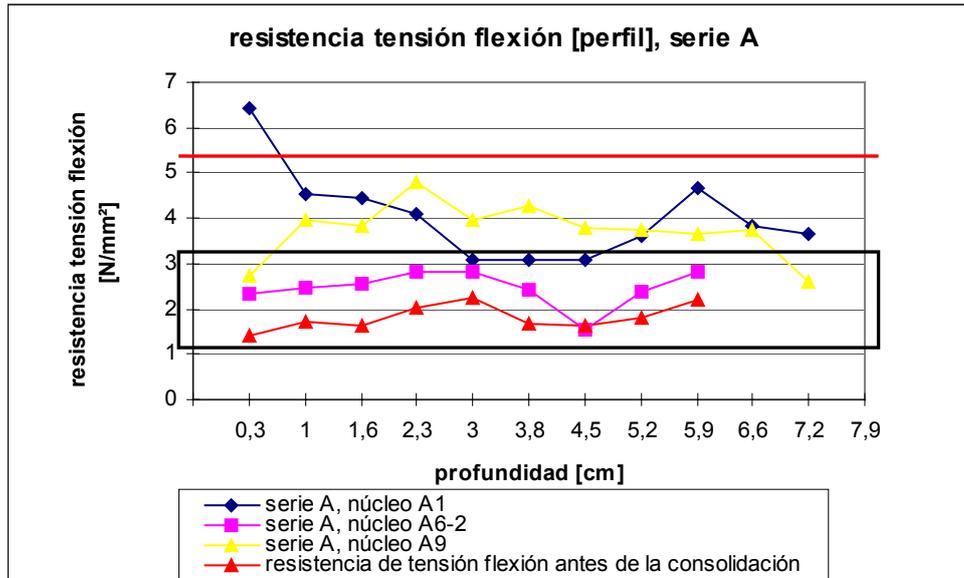


Figura 36. Diagrama del perfil de la resistencia tensión-flexión de todos los núcleos de la serie A. El rectángulo negro marca los valores de la roca en su estado original mientras que la línea roja marca el máximo límite aceptable de la dureza.

Los cambios en el módulo estático de elasticidad de los núcleos de la serie A aparecen consignados en la figura 37. Se constata que, exceptuando la parte superior del núcleo A1, encontramos un módulo estático que se encuentra en el rango de los valores de la roca en su estado original. Este resultado es favorable pues implica que el módulo de elasticidad no aumenta mucho con la resistencia de tensión flexión y que por eso ésta puede aceptar una dureza algo por encima de los valores originales.

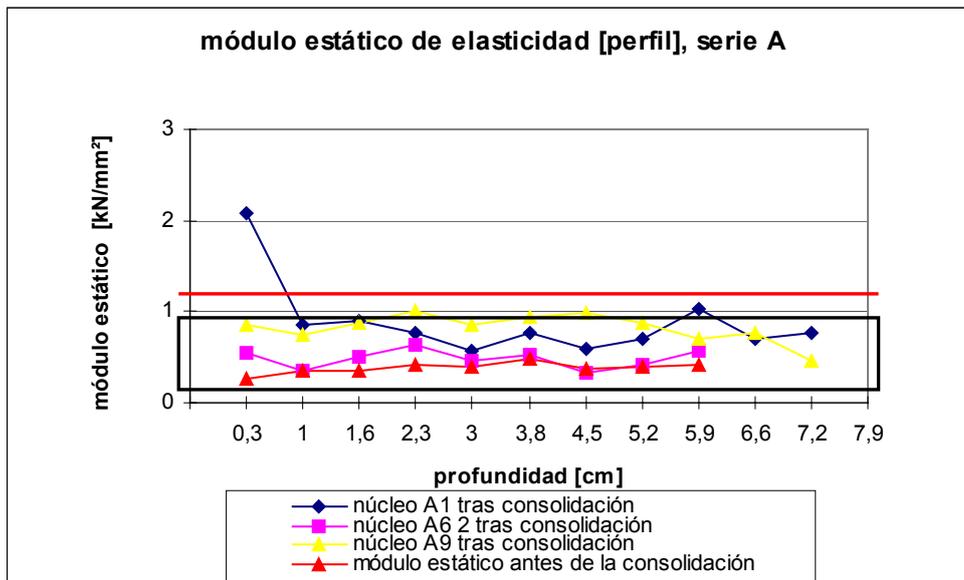


Figura 37: Diagrama del perfil del módulo estático de elasticidad de todos los núcleos de la serie A. El rectángulo negro marca los valores de la roca en su estado original mientras que la línea roja marca el límite máximo aceptable de rigidez.

En el siguiente diagrama (figura 38) se presentan los resultados de la resistencia de la serie B, en la que se aplicó el ácido tártrico, luego el silicato de etilo diluido 1:2, 1:1 y al final el silicato puro. Inicialmente se planeó la serie con tres núcleos. De estos uno hacía parte de la roca B, que fue descartada durante el estudio, por esto al final se contó solamente con dos núcleos.

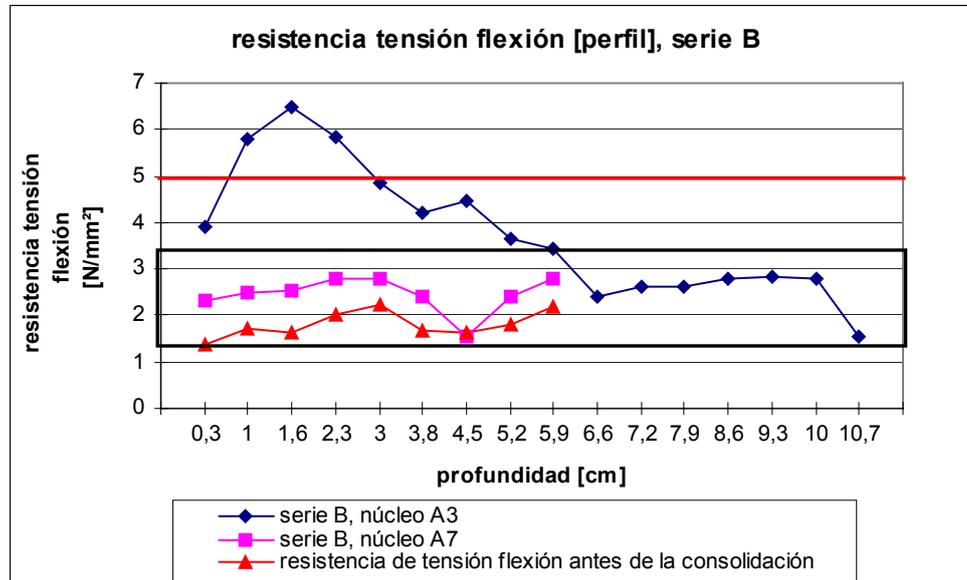


Figura 38: Diagrama del perfil de la resistencia de tensión-flexión de todos los núcleos de la serie B. El rectángulo negro marca los valores de la roca en su estado original mientras que la línea roja marca el máximo límite aceptable de la dureza.

Se observa la extrema heterogeneidad de los resultados de estos dos núcleos que hace muy difícil su evaluación. Pero los dos resultados igual dejan ver los posibles espectros del tratamiento in situ. Mientras que en el caso del núcleo A7 encontramos un aumento moderado y un perfil aceptable, el núcleo A3 muestra un alto aumento (hasta las 6 cm de profundidad) y un perfil no muy equilibrado.

Para la serie B observamos también un perfil del módulo estático de elasticidad (figura 39) poco favorable. Entre 1 y 3cm de profundidad se registra un alto aumento de la rigidez. Esto es desfavorable porque un aumento marcado a poca profundidad de la roca puede causar tensiones de cizallamiento y futuros daños. Luego, a partir de los 4cm de profundidad, donde se hizo la consolidación con el producto silicato diluido, se observa un módulo de elasticidad más favorable, que se enmarca en el límite aceptable.

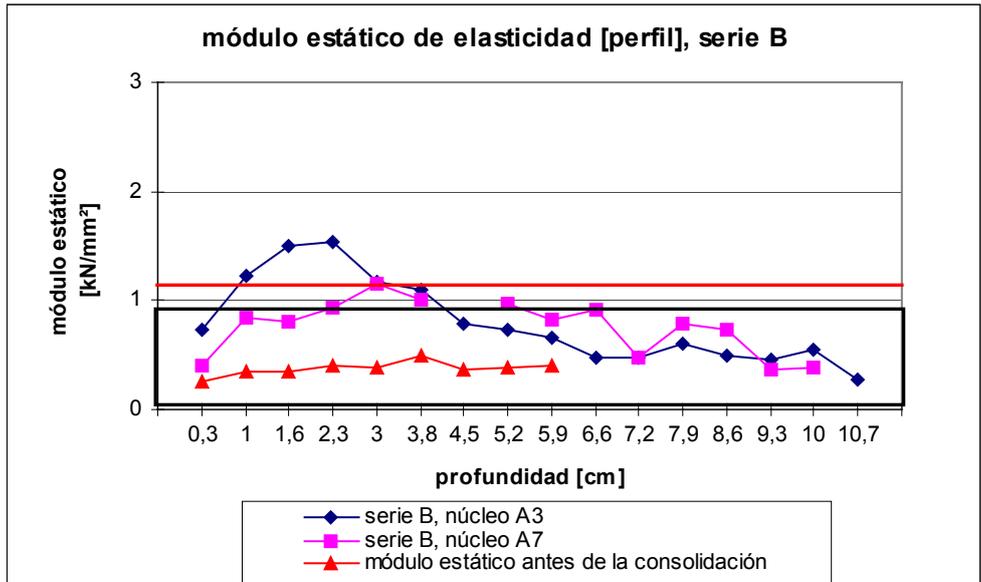


Figura 39: Diagrama del perfil del módulo estático de elasticidad de todos los núcleos de la serie B. El rectángulo negro marca los valores de la roca en su estado original mientras que la línea roja marca el máximo límite aceptable de rigidez.

En la serie C se usó el silicato diluido 1:1 y luego el producto puro. Se observa un aumento bastante marcado hasta una profundidad de más de 5cm. Mientras que para el caso de los núcleos A4 y A5 el aumento aún se encuentra dentro del límite, el núcleo A6 sobrepasa el límite aceptable.

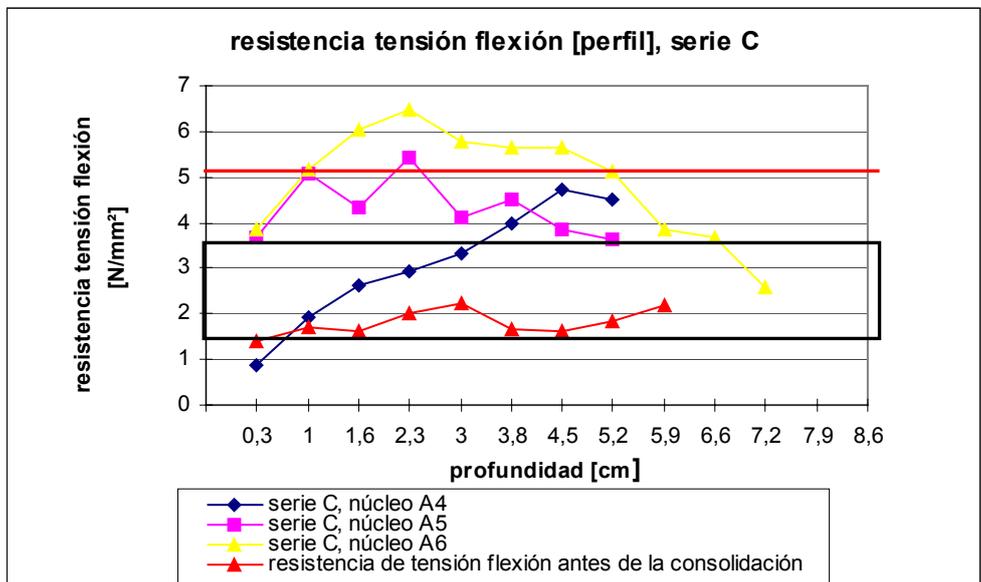


Figura 40: Diagrama del perfil de la resistencia de tensión-flexión de todos los núcleos de la serie C. El rectángulo negro marca los valores de la roca en su estado original mientras que la línea roja marca el máximo límite aceptable de la dureza.

Muy similar es el módulo estático, el cual crece de manera desfavorable en su profundidad desde 1cm de profundidad hasta alcanzar una profundidad de 6cm.

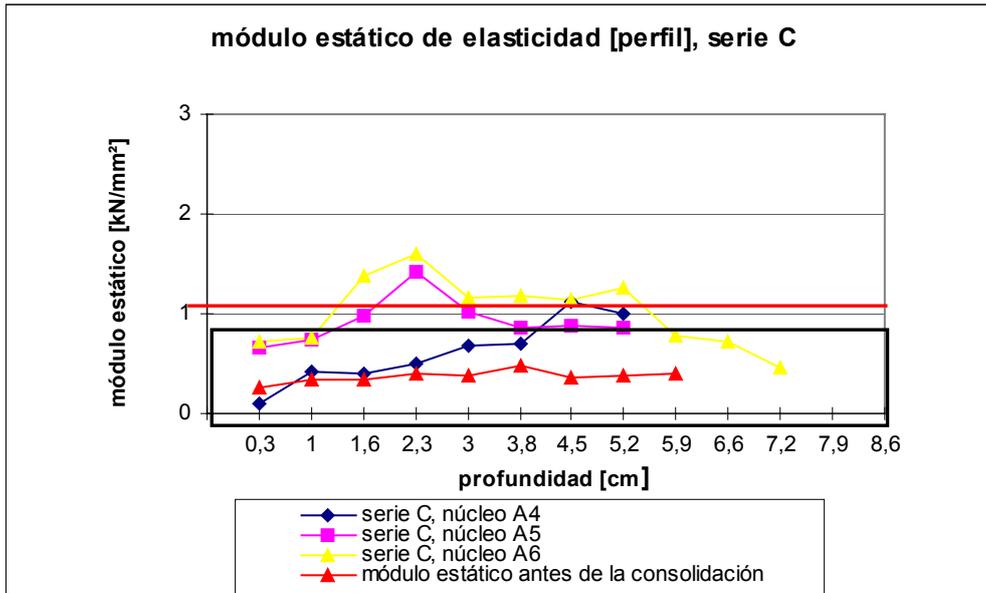


Figura 41: Diagrama del perfil del módulo estático de elasticidad de todos los núcleos de la serie C. El rectángulo negro marca los valores de la roca en su estado original mientras que la línea roja marca el máximo límite aceptable de rigidez.

La serie D contaba con tres núcleos pero el núcleo A8-1 contaba con una discontinuidad que lo fragmentó en la mitad lo que imposibilitó que se realizara el estudio de resistencia de tensión flexión sobre él. En la serie D se evaluaron entonces sólo dos núcleos. En el diagrama 42 se observan resultados muy heterogéneos y un perfil de dureza poco favorable.

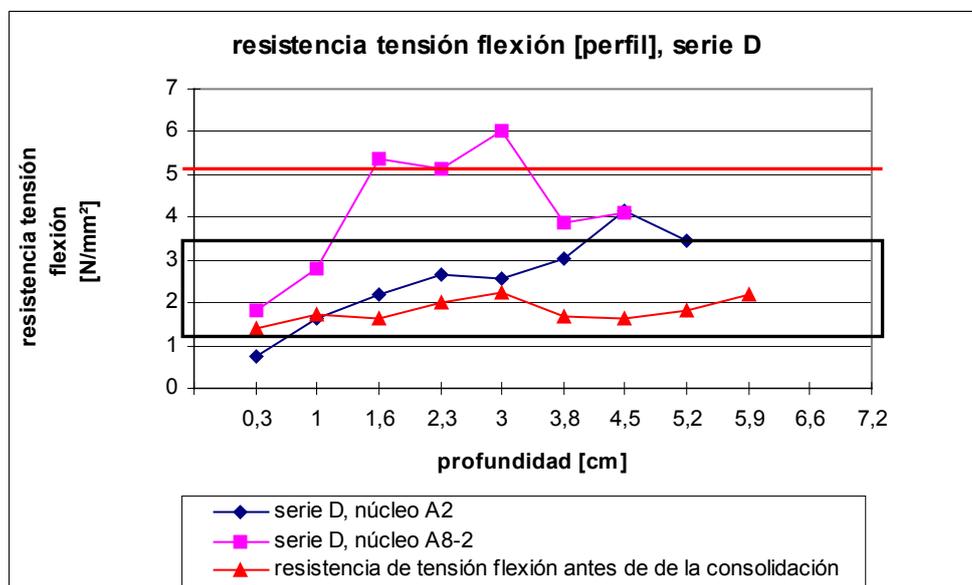


Figura 42: Diagrama del perfil de la resistencia tensión-flexión de todos los núcleos de la serie D. El rectángulo negro marca los valores de la roca en su estado original mientras que la línea roja marca el máximo límite aceptable de dureza.

Mientras que en la parte superior de los núcleos la dureza de la parte más deteriorada no registró un aumento significativo, en la parte interna la dureza sí aumentó mucho.

El módulo estático (figura 43) muestra resultados más moderados pero el perfil igual aumenta hacia la parte interna lo cual tampoco es favorable.

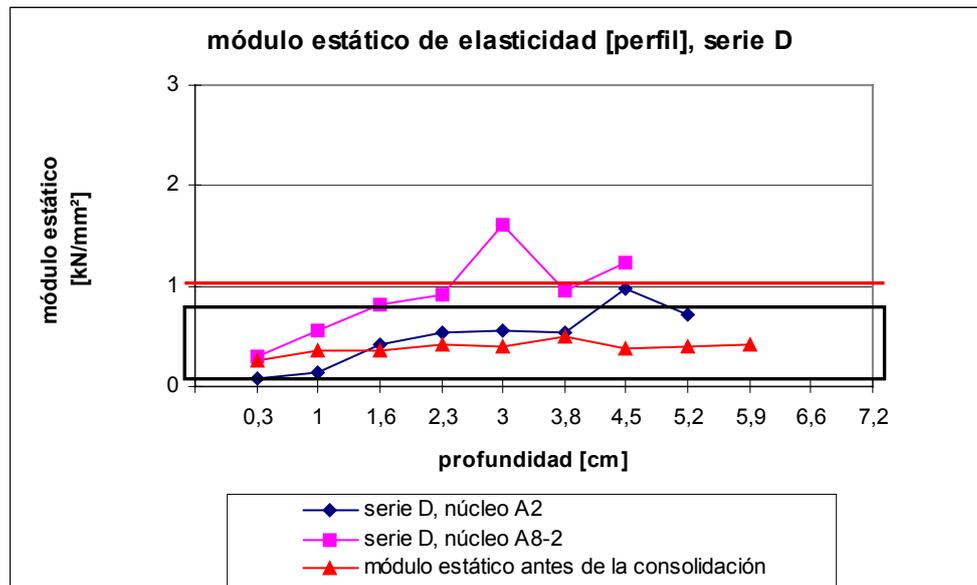


Figura 43: Diagrama del perfil del módulo estático de elasticidad de todos los núcleos de la serie D. El rectángulo negro marca los valores de la roca en su estado original mientras que la línea roja marca el máximo límite aceptable de rigidez.

De lo anterior se resume que la consolidación pudo aumentar la dureza en todos los núcleos y, como era de esperar, aumentó también la rigidez.

La serie A, por ser aquella donde la roca se encuentra en su estado original, es la que permite determinar qué va a pasar en las zonas intactas, en los alrededores de las zonas decohesas, en caso de que se produzca una cierta penetración del consolidante. Tanto para la dureza como para el módulo estático de elasticidad el resultado fue bastante favorable con un perfil muy equilibrado, lo que quiere decir que una cierta penetración del consolidante en la parte sana no debería causar problemas.

Al contrario vemos resultados muy heterogéneos y perfiles no moderados en las tres series de roca artificialmente deteriorada. En cada uno de los tres casos es muy preocupante que cerca de la superficie, aproximadamente a un centímetro de profundidad, la dureza (resistencia de tensión-flexión) y el módulo de elasticidad aumentan de manera marcada. Adicionalmente llama mucha la atención que en la serie D, una serie muy deteriorada, en la zona de los primeros milímetros, la dureza que se pretendía aumentar mediante la consolidación, no aumentó. Lo anterior plantea un panorama complejo en el que la consolidación no estabilizaría la parte que necesita estabilización y a su vez endurecería la roca hacia adentro.

Los resultados anteriormente presentados plantean una serie de consideraciones frente a un tratamiento de consolidación. Las series realizadas como tal no resultan favorables en cuanto al perfil de resistencia tensión-flexión y al módulo de elasticidad y por eso no se deberían aplicar en la Fuente.

Sin embargo, los resultados más en profundidad de los núcleos, donde se realizó la consolidación con el producto diluido y, en particular los resultados de la serie B, donde se trabajó con el consolidante muy diluido (2:1) permiten establecer que sería más favorable hacer la consolidación en profundidad con el producto muy diluido y solamente en la zona del primer centímetro, aplicar un consolidante menos diluido. Esta hipótesis tiene que rectificarse en laboratorio.

## 10. Conclusiones

En este informe se presentó el estudio comparativo de consolidantes para el tratamiento de la “decohesión” en la Fuente de Lavapatatas en el Parque Arqueológico San Agustín, Huila.

Como resultado de una revisión bibliográfica donde se reunieron gran parte de las investigaciones realizadas en torno a la conservación de toba, en este estudio se escogieron los productos ácido tártrico (Primer), Antihydro (producto que disminuye la expansión hídrica), silicato de etilo, silicato de etilo diluido 1:1 en alcohol etílico y silicato de etilo elastificado con el fin de evaluarlos como consolidantes para la decohesión.

Para tal fin se trabajó con cuatro series, en una las probetas eran de roca relativamente fresca y en las otras tres las rocas se deterioraron artificialmente. Las muestras de las series deterioradas mostraron un deterioro muy parecido al deterioro tipo “decohesión“, que se presenta en el lugar de origen, con una parte superior más deteriorada, y una parte inferior menos deteriorada. Mientras que las series deterioradas permitieron entender los efectos que los consolidantes tienen en el deterioro, fue la serie con muestras de roca en estado original la que permitió entender el riesgo que se corre con la consolidación: consolidando una zona decohesa no se podrá evitar que penetre algo de consolidante en la zona que está en buen estado de conservación.

El estudio comparativo para la evaluación de consolidantes tuvo en cuenta los estándares y requisitos internacionales, y se llevó a cabo en los laboratorios de la Fachhochschule Potsdam, Alemania.

El estudio comparativo para la evaluación de consolidantes siguió los estándares y requisitos internacionales, se realizó en los laboratorios de la Fachhochschule Potsdam, Alemania, y llevó a las siguientes conclusiones:

La evaluación de la velocidad de penetración reveló la dificultad de realizar el tratamiento de consolidación en la toba volcánica. A partir del coeficiente de absorción de agua se dedujo que 6 cm era la profundidad necesaria para una consolidación. Durante el proceso de consolidación fue muy difícil alcanzar esta profundidad a pesar de trabajar durante un tiempo extremadamente prolongado (hasta 15 horas para el silicato de etilo). Además se observó una gran heterogeneidad en el material rocoso.

Es por esto que se descarta cualquier aplicación de los productos consolidantes con pincel o aspersor, muy común en conservación de piedra. En lugar de eso se recomienda un método que asegure un flujo constante del consolidante en un tiempo prolongado. La mencionada heterogeneidad hace imposible planear una consolidación de manera general, pero en cada una de las zonas será muy importante reconsiderar la intervención.

El estudio demostró que la consolidación permitió la precipitación del gel al interior del espacio poroso de la roca lo que tiene varios efectos sobre ésta. La porosidad, la permeabilidad al vapor de agua y el coeficiente de absorción de agua disminuyeron en todas las series pero lo hicieron dentro de un marco muy aceptable. En cuanto a la absorción, comparándola con la absorción *in situ* que en gran parte de la Fuente es muy baja, la de las zonas consolidadas podría bajar aún más.

El estudio de la expansión hídrica reveló la eficacia del producto Antihygro que disminuye la expansión. Considerando que gran parte de la roca de la Fuente casi no absorbe agua y por eso tampoco expande mucho, y que las zonas decohesas en cambio, si absorben agua y según los resultados deberían tener una expansión hídrica marcada, se llega a la conclusión de que el uso del Antihygro es favorable.

No se pudo verificar la eficacia del producto ácido tartárico y por eso no se recomienda su uso.

La expansión térmica encontrada es muy equilibrada en todas las series y por eso no es un parámetro que requiera ser considerado en la evaluación de la consolidación.

Las propiedades más importantes dentro del estudio fueron la resistencia de tensión-flexión y el módulo estático de elasticidad que brindan información respecto a la posibilidad de estabilizar las zonas decohesas y de cómo cambia la rigidez de la roca al ser tratada. Se pudo demostrar que es la serie de la piedra en su estado original que mejores resultados mostró. Una consolidación en la zona cerca de la zona decohesa no debería causar efectos negativos y se obtuvo un perfil de dureza bastante equilibrado. Pero en las tres series deterioradas los resultados fueron muy heterogéneos y en ninguna serie se pudo generar un perfil de dureza y elasticidad favorable. Es más se generaron perfiles que tienen un alto riesgo de poder generar daños en la roca.

Sin embargo los resultados indican que se debería plantear una serie más. Mientras que en la parte inferior se debería realizar la consolidación con el producto silicato de etilo muy diluido (2:1) es solamente en el primer centímetro de la parte superior donde se debería aplicar un consolidante más concentrado. Es importante que estas indicaciones se verifiquen primero en laboratorio.

## 11. Bibliografía

Ahmad (2011): Abdelraheem Ahmad: Characterization of natural and consolidated stones from Jordan with non-destructive ultrasonic technique and physico – mechanical methods. Phd. Thesis at the technical university of Dortmund. Dortmund 2011.

María Paula Alvarez, Catalina Bateman, Grecia Charry, Helen Jacobsen, Lina Fernanda Martínez, Martha Patricia Ramírez, Luz Stella Villalba (2012): Consolidado sobre las investigaciones en la Fuente de Lavapatatas. ICANH

Auras, E. Steindlberger (2005): Verwitterung und Festigung vulkanischer Tuffe. In: Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften. Jg. 156, No.1, 2005. Ed.: Deutsche Gesellschaft fuer Geowissenschaften. Hannover 2005, pp.167 – 175.

Auras M., P. Eggloffstein, E. Steindlberger (2000): Vulkanische Tuffsteine – Entstehung, Verwitterung, Konservierung. In: 10 Jahre Institut für Steinkonservierung e.V. Festschrift. Bericht Nr. 10 – 2000.Ed.:K.Kraus. Mainz 2000, pp.35-52.

Bahamondez Prieto M. & al. (2007) : Ahu Tongariki – trabajos de conservación de sus 15 moai. In: Conserva 11 / 2007.

Bahamondez, P. Valenzuela (2004): Conservación de los Moai del Ahu Tongariki – Conservación del Patrimonio Arqueológico de isla de Pascua. Enero – abril 2004. Final paper proyecto UNESCO – Japón – Isla de Pascua. 2004.

Bahamondez M. (1994): conservation treatment of a Moai on easter island: a laboratory evaluation. In: Proceedings of the International meeting, Easter Island, Chile, 25 – 31 october 1990. Ed.: A.E. Charola, R.J. Koestler, G. Lombardi. Rome 1994, pp. 323-332.

Beloyannis N. (1993): Deterioration of volcanic lavas by the action of water and salts. In: Conservation of arquitectural surfaces stones and wall covering. UNESCO. Venezia. Venice 1993, pp. 161-167.

Bianchetti B.L., G.Lombardi, S.Marini, C.Meucci (1994): The volcanic rocks of the monuments of the Forum and Palatine (Rome): characterization, alterations, and results of chemical treatments. In: Lavas and Volcanic tuffs. Proceedings of the International meeting, Easter Island, Chile, 25 – 31 october 1990. Ed.: A.E. Charola, R.J. Koestler, G. Lombardi. Rome 1994, pp. 83-105.

Bianchetti P.L., G.Lombardi, C.Meucci (1982): study of the degradation of „tuff“ blocks used in the Roman Temple of Cibeles (Rome, italy). In: Proceedings of the 4th

international conference on deterioration and preservation of stone objects. Louisville, KY, July 7-9, 1982. Ed.: K.L.Gauri, J.A.Gwinn. Louisville 1982, pp. 29-38.

Bliefert & al (1997): Bliefert, Domhardt, Venzmer: Analysen zur Auswahl geeigneter Hydrophobierungsmittel für salzbelastete Sandsteine. Bautenschutz + Bausanierung. Tomo 1, 1997, p. 12-21.

Bullmann (2001): Vergleichende Untersuchungen unterschiedlicher Steinfestiger auf Kieselsäureesterbasis. Unpublished diploma thesis at the university of applied sciences Wiesbaden. Wiesbaden 2001.

Cavaletti R., L.Lazzarini, L.Marchesini, G.Marinelli (1985): A new type of epoxy resin for the structural consolidation of badly decayed stones. In: Proceedings of the 5th International congress on deterioration and conservation of stone, Lausanne, Switzerland, 25-27 september 1985. 1985, pp. 769-778.

Charola A.E. (1988): The statues of easter island: deterioration and conservation problems. In: Wiener Berichte über Naturwissenschaft in der Kunst, 4/5, 1987/88, pp. 392-401.

De Casa G., G. Giglio. G. Lombardi, M. Mariottini (1994): Characterization and state of decay of the volcanic tuff of the Tabularium in the Roman Forum, Italy. In: Lavas and Volcanic tuffs. Proceedings of the International meeting, Easter Island, Chile, 25 – 31 october 1990. Ed.: A.E. Charola, R.J. Koestler, G. Lombardi. Rome 1994, pp. 108-127.

De Witte E., A.Tervfen, R.J.Koestler, A.E.Charola (1988): Conservation of the Göreme rock: preliminary investigations, In: Proceedings of the 6th International congress on deterioration and conservation of stone. Torun, Poland, 12-14 september 1988. Ed. J. Ciabach, 1988, pp. 346-355.

Dölitzscher P. (2008): Konservierungsmöglichkeiten eines kieselsäurereichen Aschetuffs. Untersuchungen zur Wirksamkeit eines Quellminderers und Vergleich modifizierter mineralischer und kieselolgebundener Injektionsmassen für die Turmfassade der Stadtpfarrkirche Bistritz (RO). Unpublished diploma thesis at the university of applied sciences Potsdam. Potsdam 2008.

Doehne, Price (2010): Stone conservation. An overview of current research. Los Angeles 2010.

Eggloffstein P., P.Kertész, E.Althaus (1999): Vulkanische Tuffe als Werksteine – Zerfallsprozesse und Konservierungsmöglichkeiten. In: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke: Bauefüge, Konstruktionen, Werkstoffe. Jahrbuch 1996. Berlin 1999, pp. 183-190.

Eggloffstein P.(1998): Vulkanische Tuffsteine als Werksteine an historischen Bauwerken in Ungarn und Deutschland. Verwitterungsverhalten und Konservierungskonzepte. Köln 1998.

Erder E.H.(1995): Consolidation and adhesive repair of volcanic tuff. Case study: conservation of volcanic tuff at the old stone church of mission San Juan Capistrano, San Juan Capistrano, California. Unpublished thesis at the university of Pennsylvania 1995.

Fitzner B. (1985): Ermittlung von Baustoffkennwerten von Tuffgesteinen. Stuttgart 1985.

Forgó L. , H.Stück, E.Maróthy,S.Siegesmund, A.Török, J.Ruedrich (2006): Materialverhalten von natürlichen und modellhaft konsolidierten Tuffen. In: ARKUS-Tagung: Denkmalgesten Tuff. IFS Bericht Nr. 22 – 2006. Ed.: Institut für Steinkonservierung e.V. Mainz 2006, pp. 65-76.

Grassegger G., S.A.Mausfeld (1998): Sankt Stephans Münster Breisach. In: Denkmalpflege und Naturwissenschaft – Natursteinkonservierung II. Ed.: R. Snethlage.Stuttgart 1998, pp. 309-334.

Grimm, Schwarz (1984) Wolf Dieter Grimm, Ulrich Schwarz: Naturwerksteine und ihre Verwitterung an Münchner Bauten und Denkmälern. In: Natursteinkonservierung – Internationales Kolloquium, München, 21./22. Mai 1984. Arbeitsheft 31. München 1985. p. 28-118.

Grissom C.A. (1994): The deterioration and treatment of volcanic stone: a review of the literature. In: Lavas and volcanic tuffs. Proceedings of the international meeting. Easter island, chile, 25 – 31 october, 1990. Ed.: A.E. Charola,R.J. Koestler, G. Lombardi. Rome 1994, pp. 3-29.

Hatsagortsian Z.(1988): Durabilité des tuffs volcaniques et des basaltes. In: Proceedings of the 6th international congress on deterioration and conservation of stone. Torun, poland, 12-14 september 1988. Ed. J.Ciabach, 1988, pp. 149-158.

Hilbert, Boos (2001): Georg Hilbert, Markus Boos: Arbeiten zur Entwicklung des “elastifizierten” Kieselsäureesters. In: Konservierung von Wandmalerei. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege. Band 104. München 2001, p.168-182.

Hilbert G., P. Tegenkamp (2005): Durchführung systematischer Quellmessungen an nordhessischen Tuffen unter Mitberücksichtigung praxisrelevanter Konservierungsmittel und deren Kombinationsvarianten. In: Konservierungskonzepte zum Erhalt von nordhessischen Tuffsteinen. Tagungsband, Evangelische Kirche Kurhessen Waldeck. 2005.

Hilbert, Wendler (1995): Georg Hilbert, Eberhard Wendler: Zielgerechte Natursteinkonservierung: Zur Reduzierung des hygri-schen Quellens. In: Bautenschutz + Bausanierung. 3 /1995, p. 60 –64.

Jacobsen (2006): Marmorkonservierung. Vergleich ausgewählter Festigungsmittel zur Konservierung von Großkuzendorfer Marmor. Unveröffentliche Diplomarbeit an der Fachhochschule Potsdam. Potsdam 2006.

Kawasaki, C.Tanimoto (2001): Deterioration phenomena and conservation methods of stone buddha images in Japan. In: Frontiers of rock mechanics and sustainable development in the 21. century. Proceedings of the 2001 ISRM international symposium, 11 - 14 september 2001, Beijing, china. Ed: Wang Sijing. Balkema 2001, pp. 413-416.

Keßler (2000): Thomas Keßler: Untersuchung des Einflusses von quellmindernden Stoffen in Kombination mit einer Hydrophobierung auf das Quellverhalten des Lettenkohlsandsteines. Thesis en la universidad de Hildesheim. Hildesheim 2000.

Kocher (2005): Matthias Kocher: Quelldruckmessungen und thermische Druckmessungen an ausgewählten Sandsteinen. Phd thesis en la universidad Ludwig – Maximilian en munich. Munich 2005.

Kozub (2008): To the determination of the young's modulus from the biaxial flexural strength. In: 11th congress on deterioration and conservation, Torun, Poland. Ed.: J.W. Lukaszewicz, P. Niemcewicz, Torun, 2008, p.407-414.

La escalinata jeroglífica de Copán, Honduras. Resultados de los estudios y propuestas de conservación. 2006.

Laurenzi Tabasso M., A.M. Mecchi, U.Santamaria (1994): Interaction between volcanic tuff and products used for consolidation and waterproffing treatments. In: Lavas and Volcanic tuffs. Proceedings of the International meeting, Easter Island, Chile, 25 – 31 october 1990. Ed.: A.E. Charola, R.J. Koestler, G. Lombardi. Rome 1994, pp. 173-190.

Lazzarini L. , G.Lombardi, F.Marconi, C.Meucci (1996): new data on the characterisation and conservation of the easter island's pyroclastics used for the moais. In:Proceedings of the 8th International congress on deterioration and conservation of stone. Berlin 30.9-4.10.1996. Ed.: J. Riederer. Vol.2. Berlin 1996, pp. 1147-1158.

Lindner (1997): Olaf Lindner: Die Änderung der hygri-schen Dehnung und andere physikomechanische Parameter am Beispiel ausgewählter, tonmineralhaltiger Sandsteine nach der Behandlung unterschiedlicher Konservierungsmittel. Thesis en la universidad de Cologne. Cologne 1997.

Lukaszewicz J.W. (1994): The application of silicone products in the conservation of volcanic tuffs. In: Lavas and Volcanic tuffs. In: Proceedings of the International meeting, Easter Island, Chile, 25 – 31 october 1990. Ed.: A. E. Charola, R. J. Koestler, G. Lombardi. Rome 1994, pp. 191-202.

Matteini, Moles (1990): Mauro Matteini, Arcangelo Moles: Naturwissenschaftliche Untersuchungsmethoden in der Restaurierung. München 1990.

Menzl B. (2002): Der Rochlitzer Porphyrtuff – Möglichkeiten der Festigung. Unpublished diploma thesis at the university of applied sciences Potsdam. Potsdam 2002.

Menzl, Schmeikal (2002): Die lineare thermische Dehnung. Unveröffentlichte Semesterarbeit an der Fachhochschule Potsdam. Potsdam 2002.

Michnia R., E. Piaszczyński (2006): Entwicklungen in der rheinischen Tuffsteinkonservierung – Stand 1990 bis 2005. In: ARKUS-Tagung: Denkmalgestein Tuff. IFS Bericht Nr. 22 – 2006. Ed.: Institut für Steinkonservierung e.V. Mainz 2006, pp. 77-88.

Möllenkamp E.(1996): Möglichkeiten der Tuffsteinkonservierung. Die Portalfiguren des Kölner Rathauses. München 1996.

Paterno, A.E. Charola (2000): Preliminary studies for the consolidation of Guadalupe tuff from the philippines. In: Proceedings of the 9th International congress on deterioration and conservation of stone, Venice 19.7-24.7.2000. Ed.: V. Fassina. Vol.1. Amsterdam 2000, pp. 155-163.

Pauly J.P, J.Loppion, J.Saunac (1994): Weathering of easter island tuffs and proposed conservation treatments. In: Proceedings of the International meeting, Easter Island, Chile, 25 – 31 october 1990. Ed.: A.E. Charola, R.J. Koestler, G. Lombardi. Rome 1994, pp. 283-308.

Perez & al (1995): J.L.Perez, M.A.Bello, R.Villegas, J.F.Vale, M.Alcalde: comparison between several spanish treated stones submitted to salt crystallization and freeze/thaw accelerated weathering tests. In: Preprints of the International Colloquium in Rome, 19-21 June 1995: Methods of evaluating products for the conservation of porous building materials in monuments. Rom 1995, S.443-449.

Rossi-Manaressi R., G.Chiari (1980): effectiveness of conservation treatments of a volcanic tuff very similar to adobe. In: Proceedings of the 3rd International symposium on Mudbrick Preservation. Ankara 1980, pp.29-38.

Rossi-Manaressi R., R.Pellizzer (1979): The volcanic tuff of the archaeological monuments in Cochasqui, Ecuador: causes of decay and effectiveness of conservation treatments. In: Deterioration and preservation of stones. Proceedings of the 3rd international congress. Venice, Italy, 24-27 October 1979. Venice 1979, pp. 605-611.

Rossi Manaresi R. (1976): Causes of decay and conservation treatments of the tuff of Castel dell'Ovo in Naples. In: Proceedings of the 2nd international symposium on the deterioration of building stones, Athens, 27 September – 1 October 1976.

Ruedrich (2002): Gefügekontrollierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore. Dissertation an der Universität Göttingen. Göttingen 2003.

Sawada M., M. Bahamondez, S. Inoue, Y. Araki (2004): Modification of the reinforcing agent suitable for each degree of damage on Moai statue. In: The Renaca papers: 6th conference on Easter Island and the Pacific, Ed.: Stevenson. Chile 2004.

Schenk A. (1996): Eignung von Kieselsäureestern zur Festigung von ausgewählten Tuffsteinen. Unpublished diploma thesis at the University of Applied Sciences Wiesbaden. Wiesbaden 1996.

Schubert P, B. Fitzner, O. Schwab, J. Zallmanzig (1992): Mauerwerk aus Tuffstein. Aachen 1992.

Sheremeti-Kabashi (2002): Untersuchungen der Gefügeanisotropie von Carrara-Marmor und deren Einfluss auf die Verwitterung. Dissertation an der Ludwig-Maximilians-Universität München. München 2002.

Siedel (2006): Sächsische „Porphyrtuffe“ aus dem Rotliegend als Baugesteine: Vorkommen und Abbau, Eigenschaften und Verwitterung. In: ARKUS-Tagung: Denkmalgestein Tuff. IFS Bericht Nr. 22 – 2006. Ed.: Institut für Steinkonservierung e.V. Mainz 2006, pp. 47-58.

Siedel H., D.J. Honsinger, M. Breitbach (1995): Laborversuche zur Substanzverfestigung und Horizontalabdichtung. In: Die Tulpenkanzel im Dom zu Freiberg. Ed.: A. Kiesewetter, H. Siedel, M. Stühr. Dresden 1995, pp. 119-128.

Simon (2001): Zur Verwitterung und Konservierung kristallinen Marmors. Dissertation an der Ludwig Maximilians Universität München. München 2001.

Snethlage (1997): Leitfaden Steinkonservierung. Stuttgart 1997.

Snethlage (1984): Steinkonservierung. Forschungsprogramm des Zentrallabors für Denkmalpflege 1979-1983. München 1984.

Snethlage, Wendler (2000): Chemical compounds for conservation of natural stone. LMU München, Fachbereich Geowissenschaften. München 2000.

Snethlage, Wendler (1995): Rolf Snethlage, Eberhard Wendler: Methoden der Steinkonservierung. Anforderungen und Bewertungskriterien. In: Denkmalpflege und Naturwissenschaft / Natursteinkonservierung I. Berlin 1995, S. 3 – 40.

Snethlage, Wendler, Klemm (1997): Tenside im Gesteinsschutz – bisherige Resultate mit einem neuen Konzept zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein. In: Natursteinkonservierung I. Ed. R. Snethlage. Berlin 1995, p.127-146.

Steindlberger E. (2002): Untersuchungen zum physiko-chemischen Verwitterungsverhalten hessischer Tuffe. Frankfurter Geowiss. Arbeiten, Frankfurt am Main 2002.

Steindlberger, Auras (1999): Hessische Tuffsteine und ihr Verwitterungsverhalten am Bauwerk. In: Werkstoffeigenschaften und Bauinstandsetzen V. Band 2. Aedification publishers, Freiburg 1999, pp. 1481 – 1494.

Stück H. , L.Z.Forgó, J.Rüdrich, S.Siegesmund, Á Török (2008): The behaviour of consolidated volcanic tuffs: weathering mechanisms under simulated laboratory conditions. In: Environmental geology. No.56. 2008, pp. 699-713.

Teutonico (1997): J. M. Teutonico: Group report: how can we ensure the responsible and effective use of treatments (cleaning, consolidation, protection)? In: Dahlem Workshop reports: saving our architectural heritage – the conservation of historic stone structures, Berlin, March 3 - 8, 1996. Hrsg.: N. S. Baer, R.Snethlage. Chichester 1997, S. 293 - 313.

Török A., L.Z. Forgó, S. Siegesmund (2006): assessment of the susceptibility of various tuff types to weathering: field and laboratory tests. In: ARKUS-Tagung: Denkmalgestein Tuff. IFS Bericht Nr. 22 – 2006. Ed.: Institut für Steinkonservierung e.V. Mainz 2006, pp. 25-34.

Toeroek A., T.Vogt, St.Lobens, L.Z.Forgo, S.Siegesmund, Th.Weiss (2005): Weathering forms of rhyolite tuff. In: Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften. Jg. 156, No.1, 2005. Ed.: Deutsche Gesellschaft fuer Geowissenschaften. Hannover 2005, pp. 177 – 187.

Topal T., B.Sözmen (2003): Deterioration mechanisms of tuff in Midas monument. In: Environmental geology 68, 2003, pp.378-390.

Torres Montes L., D.Alvarez Gasca, M. Reyes, J. Hernandez Rivero (1994): The Cuauhcalli – a monolithic aztec temple at Malinalco, Mexico: deterioration and conservation problems. In: Lavas and Volcanic tuffs. Proceedings of the International meeting, Easter Island, Chile, 25 – 31 October 1990. Ed.: A.E. Charola, R.J. Koestler, G. Lombardi. Rome 1994, pp. 63-72.

Useche L.A. (1994): Studies for the conservation of the facade of the church of Santo Domingo, Popayan, Colombia. In: Lavas and volcanic tuffs. Proceedings of the international meeting. Easter Island, Chile, October 25–31, 1990. Ed.: A.E. Charola, R.J. Koestler, G. Lombardi. Rome 1994, pp. 165-172.

Vacchiano C.D, L. Incarnato, P.Scarfato, D.Acierno (2008): conservation of tuff-stone with polymeric resins. In: Construction and building materials. VOL: 22, issue 5, 2008, pp. 855-865.

Von Krosig P.(1998): Verfestigung von durch Witterungseinflüsse geschädigten Oberflächen ausgewählter Natursteine. Unpublished diploma thesis at the university of applied sciences Wiesbaden. Wiesbaden 1998.

Voute V.(1969): Indonesia – geological and hydrological problems involved in the preservation of the monument of Borobudur. Document of the UNESCO. Paris 1969.

Wendler (2008): Lapillituff – ein häufig verwendetes und empfindliches Baugestein mit Konservierungsproblemen. In: Erhaltung seltener Denkmalgesteine. Ed.: Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum. Berlin 2008, pp. 57-66.

Wendler (2006): Probleme, Lösungsansätze und Erfolge bei der Konsolidierung von verwittertem Lapillituff. In: ARKUS-Tagung: Denkmalgestein Tuff. IFS Bericht Nr. 22 – 2006. Ed.: Institut für Steinkonservierung e.V. Mainz 2006, pp. 89-100.

Wendler (2005): Festigung von Problemgesteinen. In: Stein – Zerfall und Konservierung. Ed.: S.Siegesmund, M.Auras, R.Snethlage. Leipzig 2005, pp. 109-114.

Wendler (2004): Conservation and restoration of statues on Easter Island. Laboratory experiments and proposals for the consolidation of the statues. In: The Renaca papers: 6th conference on Easter Island and the Pacific. Ed.: Stevenson. Chile 2004.

Wendler (1996): Eberhard Wendler: New materials and approaches for the conservation of stone. In: Dahlem Workshop reports: saving our architectural heritage – the conservation of historic stone structures, Berlin, March 3 - 8, 1996. Hrsg.: N. S. Baer, R. Snethlage. Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto 1997, S. 181 - 196.

Wendler E., A.E.Charola, B.Fitzner (1996): Easter island tuff: laboratory studies for its consolidation. In: Proceedings of the 8th International congress on deterioration and conservation of stone. Berlin 30.9-4.10.1996. Ed.: J. Riederer. Vol.2. Berlin 1996, pp. 1159-1170.

Wheeler (2005): George Wheeler: Alkoxysilanes and the consolidation of stone. Los Angeles 2005.

## LISTA DE FIGURAS

1. La foto muestra una zona dentro de la Fuente donde se observa el deterioro llamado decohesión. El área presenta más irregularidades mientras que los bordes aparecen más lisos, al tacto se desprenden partes mínimas de roca.
2. En la foto se presenta otra zona de la Fuente donde hay decohesión allí las irregularidades no resultan tan evidentes sin embargo la prueba al tacto permite corroborar la pulverulencia.
3. Microfotografía de la sección delgada 2 que presentaba decohesión. En color azul se observan varias fisuras y poros de diferentes tamaños.
4. El levantamiento de las zonas decohesas en la Fuente (situación en el 2009).
5. Zona con decohesión donde se observan también fisuras con dimensiones de  $500\mu\text{m}$  y más y partículas más grandes disgregadas.
6. Vista general de la zona de donde fue tomada de la muestra A para el estudio consolidante.
7. Detalle de la zona donde fue tomada la muestra A para el estudio del consolidante.
8. La muestra B se encontraba suelta en el lecho de la Fuente
9. Núcleos que se extrajeron de la muestra A. La mayoría de estos núcleos se seccionaron debido a las discontinuidades características de la roca.
10. Detalle de la muestra A donde se observan discontinuidades dentro de la roca.
11. Microfotografía de la sección A1.
12. Microfotografía de la sección delgada A3.
13. Microfotografía de la sección delgada B1.
14. Núcleos calentándose por el lado superior que es el que mostrará mayor deterioro

15. la muestra A3 antes y después de deterioro. Ya macroscópicamente se observa el deterioro de la muestra en donde además de partículas pequeñas disgregadas también se obtuvo una fisura más grande.
16. Microfotografía de la sección delgada de la roca A1, artificialmente deteriorada. Mientras que se observan fisuras más pequeñas en la Foto de la derecha, a la izquierda se observa una fisura grande que se abre con un ancho de 220  $\mu\text{m}$ .
17. Para asegurar la impregnación homogénea de los núcleos, estos se separaron del vidrio con la ayuda de delgados palos de madera. La foto documenta la impregnación con el producto que debería disminuir la dilatación hídrica.
18. Núcleos durante la consolidación con silicato de etilo. Las rayas sobre la superficie de cada núcleo marcan 5 mm lo que facilita estudiar la velocidad de la penetración.
19. Núcleos de la serie B, los dos del frente son el A3 y A7. En ambos se empezó la impregnación con el ácido tártrico al mismo tiempo, pero después de varias horas se observaba que los horizontes de humedad habían llegado a niveles muy diferentes.
20. En el estudio de la porosidad accesible al agua las muestras deben absorber agua por capilaridad y durante 48 horas por lo cual se sumergen bajo una capa de 2cm de agua.
21. Para el estudio de permeabilidad se fijan con cera muestras redondas sobre recipientes llenos con agua.
22. Las muestras para estudiar la permeabilidad al vapor de agua se guardan en una cámara climática.
23. El diagrama presenta los rangos de los valores en el estudio del factor de resistencia al vapor de agua  $\mu$ . La línea negra marca el límite aceptable del aumento según Snethlage, Wendler 1995, Snethlage 1997. SE = silicato de etilo; SE 1:1 silicato de etilo diluido 1:1 en alcohol etílico.
24. Dos núcleos de la serie A durante el estudio del coeficiente de agua. Se observa que si bien los dos núcleos pertenecen a la misma serie y deberían mostrar un comportamiento similar, un núcleo casi no absorbe agua mientras que el otro (A6-2) presenta un horizonte de humedad más elevado.
25. El estudio del coeficiente de absorción de agua en dos núcleos de la serie C. Aquí también se observa que mientras que en el núcleo A4 el horizonte de humedad es elevado, en el núcleo A6 el agua casi no ha ascendido.
26. Se observan tres núcleos, dos en recipientes transparentes, uno en recipiente de aluminio durante el estudio de la expansión hídrica.
27. Montaje del ensayo para el estudio de la expansión térmica en los laboratorios de la Fachhochschule Potsdam, Alemania.

28. Los resultados del estudio de la expansión hídrica. Se presentan los promedios. Donde se presentan varios resultados la desviación entre los resultados no permite de presentar un promedio.
29. Diagrama donde se presenta el rango de los resultados del estudio de la expansión térmica. En azul la orientación 'x', en amarillo la orientación 'y'. Por el tiempo limitado del estudio no se evaluaron en todas las series varias muestras, para las cuales no se marca un rango sino solo un punto. La raya negra marca el límite aceptable del aumento según Snethlage, Wendler 1995; Snethlage 1997.
30. Las muestras para estudiar los efectos del consolidante sobre la roca.
31. Medición de la velocidad de ultrasonido sobre el diámetro de un núcleo.
32. Diagrama de los resultados del estudio de velocidad del ultrasonido (medición en el diámetro de los núcleos). Se presenta el promedio de cada serie.
33. Diagrama que muestra el aumento de la velocidad del ultrasonido [%] en las cuatro series de consolidación.
34. El estudio de tensión flexión realizado en el laboratorio de la Fachhochschule Potsdam. Se observa el montaje con el cual se realiza el ensayo en una muestra.
35. Figura 35. Diagrama del perfil de la resistencia tensión flexión en las cuatro series. El rectángulo negro marca los valores de la roca en su estado original mientras que la línea roja marca el límite máximo aceptable de dureza.
36. Diagrama del perfil de la resistencia tensión flexión de todos los núcleos de la serie A. El rectángulo negro marca los valores de la roca en su estado original mientras que la línea roja marca el máximo límite aceptable de la dureza.
37. Diagrama del perfil del módulo estático de elasticidad de todos los núcleos de la serie A. El rectángulo negro marca los valores de la roca en su estado original mientras que la línea roja marca el máximo límite aceptable de rigidez.
38. Diagrama del perfil de la resistencia tensión flexión de todos los núcleos de la serie B. El rectángulo negro marca los valores de la roca en su estado original mientras que la línea roja marca el máximo límite aceptable de la dureza.
39. Diagrama del perfil del módulo estático de elasticidad de todos los núcleos de la serie B. El rectángulo negro marca los valores de la roca en su estado original mientras que la línea roja marca el máximo límite aceptable de rigidez.
40. Diagrama: de la resistencia tensión flexión de todos los núcleos de la serie C. El rectángulo negro marca los valores de la roca en su estado original mientras que la línea roja marca el máximo límite aceptable de dureza.
41. Diagrama del perfil del módulo estático de elasticidad de todos los núcleos de la serie C. El rectángulo negro marca los valores de la roca en su estado original mientras que la línea roja marca el máximo límite aceptable de rigidez.

42. Diagrama del perfil de la resistencia tensión flexión de todos los núcleos de la serie D. El rectángulo negro marca los valores de la roca en su estado original mientras que la línea roja marca el máximo límite aceptable de dureza.
43. Diagrama del perfil del módulo estático de elasticidad de todos los núcleos de la serie D El rectángulo negro marca los valores de la roca en su estado original mientras que la línea roja marca el máximo límite aceptable de rigidez.

## LISTA DE TABLAS

1. Principales propiedades relacionadas con la porosidad de varias probetas de la muestra A
2. Aumento del coeficiente de absorción de agua durante el deterioro artificial
3. Propiedades físicas de varias probetas artificialmente deterioradas de la muestra A
4. Los estudios reglamentarios para la evaluación de las propiedades de la roca
5. Condiciones para la evaluación de la consolidación (Snethlage 1997, p. 81.)
6. Los estudios realizados para evaluar la consolidación de toba
7. resumen de las series de consolidantes.
8. Relación del tiempo de penetración de los diferentes productos en dos núcleos
9. Disminución de la porosidad en las cuatro series de consolidación
10. Resultados del estudio del coeficiente de absorción de agua y su disminución por la consolidación.
11. Resultados del estudio de la expansión hídrica realizado en muestras de la roca original, la roca deteriorada, la roca tratada con Antihygro y la roca consolidada.
12. Se presentan los rangos de los valores dentro del estudio del factor de resistencia al vapor de agua  $\mu$ . Índice: ES = etilo de silicato; ES 1:1 etilo de silicato diluido 1:1 en alcohol etílico. La raya negra marca el límite defendible del aumento según Snethlage 1997.
13. Los resultados del estudio de coeficiente de agua y la reducción del coeficiente por la consolidación.
14. Resultados del estudio de la expansión hídrica realizado en muestras de la roca original, la roca deteriorada, la roca tratada con Antihygro y la roca consolidada.
15. Los resultados de lestudio de la expansión hídrica. Se presentan los promedios. Donde se presentan varios resultados la desviación entre los resultados no permite de presentar un promedio.